



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

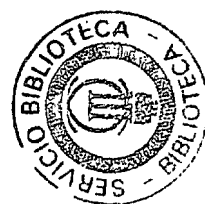
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CONTROL DE ROBOTS ESCALADORES.
APLICACIÓN A LAS TAREAS DE INSPECCIÓN**

Autor

Antonio Giménez Fernández
Ingeniero Industrial



Directores

Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós
Doctor Ingeniero Industrial

José Manuel Pastor García
Doctor Ingeniero Industrial

Leganés, 2000

A la memoria de mi madre

Agradecimientos

Por fin ha llegado la hora de escribir la última página de este trabajo. No sería justo decir que todo el trabajo que hay en esta tesis se ha hecho sin la ayuda de nadie.

Quisiera expresar mi más sincera gratitud, especialmente, a mis dos directores de tesis, Carlos Balaguer y José Manuel Pastor por su inestimable ayuda y sus valiosas aportaciones al desarrollo de este trabajo. Gran parte de los trabajos que aparecen aquí han sido alentados por ellos. Tampoco quiero olvidarme de Francisco José Rodríguez Urbano, por su permanente ayuda y total disposición ante cualquier problema que surgiera. Gracias, Paco.

Tampoco quisiera olvidarme de Mohamed Abderrahim, y Víctor Manuel Padrón por sus interesantes aportaciones en los trabajos de esta tesis, que han sido muy valiosos. Sin ellos este trabajo no hubiese sido el mismo. También quisiera agradecerles sus aportaciones al desarrollo del robot ROMA.

Durante este trabajo también han ayudado a poner su granito de arena Alberto Jardón Huete, siempre dispuesto a echar un cable, Jesús Alonso Barriuso, y Jorge Thomas Rubio, a pesar los quebraderos de cabeza que hemos tenido algunas veces.

Gracias a Miguel Angel Salichs y a Luis Moreno, por darme la oportunidad de conocer el mundo de los robots móviles, que hasta ahora era totalmente desconocido para mí. Miguel Angel Salichs es el culpable de haber puesto a nuestra disposición una magnífica biblioteca en la que consultar cualquier libro o artículo que he necesitado para este trabajo, y no sólo los relacionados con el mundo de la robótica. Gracias a Luis, por



repartir las clases adecuadamente, dejándome tiempo para terminar el trabajo. Aunque, la verdad, me gusta más el reparto que hace en verano.

Gracias a J.M. Armingol, Arturo, Vicente y Ramón por los buenos años disfrutados en esta Universidad. El trabajar junto a ellos ha hecho mucho más llevadero los malos ratos que se pasan cuando algo no funciona como debiera.

Gracias a todos los compañeros nuevos, a las nuevas generaciones por su ímpetu y sus ganas de hacer las cosas, Ramiro, María Jesús, Beatriz, Dolores, Eladio, Cristina, Mario, Verónica, y Samuel. Gracias a todos, por haber colaborado de una manera u otra a hacer más fácil cada día de trabajo. Quisiera agradecer a Santiago la ayuda que me ha prestado a la hora de realizar la identificación.

No debiera olvidarme de Manuel Ferre, Luis Felipe Peñín, Ernesto Gambao, Antonio Barrientos y Rafael Aracil, y demás compañeros y profesores de DISAM, con los que he compartido grandes momentos durante mis inicios en el mundo de la investigación.

Gracias Rosi, por la paciencia y el cariño que has tenido conmigo. Quisiera devolverte todo el tiempo que no he podido dedicarte durante el trabajo de esta tesis. Ha sido muy grande el apoyo que me has dado, incluso algunas tardes sentada en una butaca mientras me dedicaba a escribir este texto, quizás debería empezar por regalártela.

Finalmente, quiero agradecer la paciencia y comprensión de mi familia y de mis amigos que tanto tiempo han esperado este libro.

Resumen

Durante los últimos años son notables los esfuerzos que se están dedicando a incrementar el nivel de automatización de los sectores más tradicionales en este aspecto, como por ejemplo, es el de la construcción. La principal dificultad que presentan estos sectores es la falta de uniformidad en su entorno, al contrario de lo que ocurre en la industria del automóvil, o en las manufactureras, por ejemplo.

Conforme aumenta el número y edad de las construcciones y de las obras civiles, también se incrementa el número de trabajos de inspección y mantenimiento que hay que hacer sobre ellas. Todas las actividades relacionadas con estos trabajos son muy peligrosas y sólo pueden ser llevadas a cabo por personal muy cualificado. Durante los últimos años ha crecido el interés por crear robots que sean capaces de cumplir con estas tareas, y son muchos los grupos de investigación dedicados a este campo.

Los robots industriales tradicionales no sirven para realizar esta clase de trabajos. Están pensados, principalmente, para trabajar en entornos estructurados. Los robots que trabajen en un edificio o en un puente tienen que ser capaces de moverse por toda la estructura, escalar por ella, y llegar a los lugares más inaccesibles. En esta tesis se abordan temas de gran importancia respecto al diseño de esta clase de robots, y los movimientos posibles en las estructuras tridimensionales. Por estructura tridimensional se entiende lo que puede ser el esqueleto de un edificio, formado por vigas y pilares, la estructura metálica de un puente, o la cubierta metálica de un polideportivo.

El reino animal es una buena fuente de estudio para el diseño de un robot escalador. En esta tesis se ha hecho un estudio de los métodos de agarre y un análisis de la estructura muscular y ósea de los animales escaladores más significativos. También se han estudiado las estructuras cinemáticas de algunos de ellos. Hay que indicar que muchos de ellos han sido y son fuente de inspiración para la creación de los robots escaladores más conocidos. Sin embargo, no se debe perder de vista una máxima: el movimiento de cualquier animal, ya sea caminando, corriendo o escalando, siempre será mucho más elegante y más avanzado que el que se pueda lograr con cualquier vehículo caminante o escalador, de los construidos hasta ahora.

Si estos robots trabajan en un entorno muy amplio, es necesario comunicarse con ellos desde una estación base. Es importante tener una comunicación fiable, sabiendo que tipo de control se lleva a cabo en el robot y cuál en la estación base. En esta tesis se proponen distintos niveles jerárquicos de control, junto con diferentes niveles de seguridad para conseguir un buen funcionamiento de todo el sistema, tanto en el ordenador de la base como en el que está a bordo del robot escalador.

A la hora de controlar la posición de un robot escalador, la fuerza de gravedad juega un gran papel, su efecto es mucho mayor que el que se pueda producir en un robot tradicional. Normalmente los elementos que componen un robot escalador se eligen con características de dimensiones y peso más ajustadas que en el caso de un robot industrial. Un robot escalador debe ser capaz de soportar y mover su peso, mientras que los robots con una base fija no. Si se quiere desarrollar un sistema de control de posicionamiento adecuado para un robot escalador se hace necesario la creación y estudio de modelos dinámicos que permitan conocer el papel primordial que juega, la gravedad durante el movimiento del robot.

Abstract

In the last years great efforts are made to increase the level of automatization on those fields, that like building, are still making use of traditional working techniques. The main difficulty that they recently face is the lack of uniformity in their environments, contrary to such sectors like manufacture or car industry.

The increasing number and age of buildings and civil construction requires an increase in the number of inspections and maintenance works on these buildings. All tasks related to this work are very dangerous and can only be carried out by a highly qualified personnel. In the last years the interest in designing robots able to perform this sort of tasks has considerably increased. Therefore, many research groups are recently devoted to this study.

Traditional industrial robots are not able to perform this sort of tasks, since they are designed to work always under structural environments. However, robots working on a building or a bridge should be able to move themselves along the whole structure and reach also the most hidden places. Relevant aspects to the design of these robots are dealt with in this thesis, as well as robot movements in a tridimensional structure. Under tridimensional structure it is understood, for instance, the structure of a building, its beams and pillars, metallic piers of a bridge or the metallic frame of a sport center.

Animals offer a great inspiration for the design of climbing robots. A study of grasping methods, as well as an analyses of the muscular and bone structure of the most representative climbing animals, are presented in this work. Kinematics of some of them are also considered. It is interesting to point out that the design of the most important climbing robots are inspired in these animals. However, until now it has not

been designed a walking or climbing robot whose movements when walking, running or climbing, are so smooth and perfect as those of the animals.

When these robots work in an spacious environment, it is required the use of a central station for the communication to be established. It is essential to rely on a good communication to have always knowledge of the state of the tasks being performed by the robots an in the central station. Different hierarchy levels of control and security are proposed in this thesis in order to achieve a satisfactory work of the system as whole; in the “ground” computer as well as in on board computers.

Gravity plays a crucial role in the control of climber positions, due mainly to the greater gravitational effect on these robots than on traditional ones. Normally the climbing robot components are chosen more adequately regarding weight and dimensions, contrary to the case of traditional robots. A climber should be able to bare and move its own weight whereas this property is not traditionally required. In order to obtain an adequate control system of a climber it is needed the study and development of dynamic models, which allows us to know the relevant role played by the gravity in these systems.

Índice general

Resumen	i
Abstract	iii
Índice	v
Lista de figuras	xi
Lista de tablas	xv

1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Tema e importancia de la tesis	4
1.3 Objetivos de la tesis. Estructura	5
2. Robots escaladores	7
2.1 Introducción	7
2.2 Definiciones previas	9
2.3 Campos de aplicación y tareas	15
2.4 Tipos de robots escaladores	20
2.4.1 Clasificación según tipo de superficie	20
2.4.1.1 Robots que andan por suelos o paredes	20
2.4.1.2 Robots que andan por suelos y paredes	21
2.4.1.3 Robots que andan por vigas y columnas	22
2.4.2 Dispositivos de sujeción	23
2.4.2.1 Ventosas de vacío	24
2.4.2.2 Electroimanes	25
2.4.2.3 Pinzas o abrazaderas	26
2.4.3 Tipos de accionamiento	27
2.4.3.1 Eléctrico	27
2.4.3.2 Neumático	27
2.4.3.3 Mixto	28
2.5 Control de robots escaladores	28
2.6 Trabajos desarrollados en los últimos años	30
2.6.1 Centros japoneses	30
2.6.1.2 Universidad de Miyazaki	31
2.6.1.3 Laboratorio de ingeniería mecánico-espacial (Instituto de Tecnología de Tokyo)	33
2.6.1.4 Instituto técnico de investigación de Kajima Corporation	35
2.6.2 Centros norteamericanos	36
2.6.2.1 Instituto de tecnología de California (JPL)	36
2.6.2.2 Departamento de ingeniería mecánica del MIT	37
2.6.2.3 Instituto de robótica (CMU)	38
2.6.3 Centros europeos	39
2.6.3.1 Universidad de Portsmouth (UK)	39
2.6.3.2 Instituto para los problemas en mecánica (Rusia)	43
2.6.3.3 Instituto Fraunhofer de fabricación y automatización (IPA), (Alemania)	44
2.6.3.4 Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Sistemas de la Universidad de Catania (Italia)	45
2.6.3.5 Centro de estudios e investigaciones técnicas (CEIT), (España)	46
2.6.3.6 Instituto de Automática Industrial (España)	47

2.6.3.7 Universidad de Elche (España)	48
3. Estudio del reino animal	53
3.1 Introducción	53
3.2 Adaptaciones estructurales	55
3.2.1 Reptiles	55
3.2.2 Mamíferos	57
3.2.3 Insectos	59
3.3 Distintas adaptaciones del caminar	63
3.3.1 Adaptaciones para conseguir una mayor velocidad	63
3.4 Adaptaciones para desplazarse escalando	65
3.4.1 La fricción	66
3.4.2 El entrelazado	69
3.4.3 La adhesión	70
3.5 Tipos de locomoción en los animales escaladores	71
3.5.1 Pasear, correr, saltar y brincar	71
3.5.2 Extenderse, empujarse, colgarse	72
3.5.3 Balanceo de brazos	73
3.6 Mecanismos de agarre	74
3.6.1 Agarre por presión	75
3.6.2 Balanceo, braceo y succión	76
3.6.3 Engancharse, pegarse	77
3.6.4 Adhesión	78
3.7 Diferencias entre los seres vivos y las máquinas	81
3.8 Consideraciones generales sobre el diseño de los robots escaladores	83
3.9 Conclusiones	86
4. Metodología de diseño de robots escaladores. Aplicación al robot ROMA	87
4.1 Introducción	87
4.2 Metodología de diseño de robots escaladores	88
4.3 Entorno de trabajo del robot ROMA	90
4.3.1 Importancia del entorno y de las operaciones de inspección y mantenimiento	90
4.3.2 Especificaciones del entorno para el robot ROMA	92
4.4 Diseños preliminares para diseñar un robot capaz de moverse por vigas y columnas	94
4.5 Diseño elegido	99
4.4.1 Secuencias distintas de movimiento del diseño elegido	100
4.6 Descripción cinemática	103
4.7 Cálculo dinámico. Descripción electromecánica del robot	109
4.8 Análisis de las fuerzas que se producen en la escalada	116
4.8.1 Condiciones de prevención de caída	118
4.8.2 Ecuaciones de prevención del deslizamiento	119

4.9 Arquitectura hardware	120
4.9.1 Ordenador central del robot	121
4.9.2 Control de posición de un motor. Esquema básico	121
4.9.3 Esquema hardware del robot ROMA	122
4.9.4 Amplificador	123
4.9.5 Tarjetas multiplexoras	125
4.9.6 Tarjeta de control de ejes	126
4.9.7 Captadores de posición	127
4.9.8 Sistema sensorial	128
5. Sistema de control	131
5.1 Introducción	131
5.2 Esquema general de conexión	132
5.3 Programas del robot	135
5.3.1 Funciones de la tarjeta controladora de ejes	135
5.3.2 Funciones del ordenador central del robot	139
5.4 Programas en el ordenador de la base	142
5.5 Lenguaje de programación del robot ROMA	150
5.6 Niveles de seguridad	151
5.6.1 Diseño mecánico	152
5.6.2 Diseño eléctrico y electrónico	153
5.6.3 Medidas software	154
5.7 Programas de búsqueda del mejor camino	156
6. Identificación de robots escaladores	159
6.1 Introducción	159
6.2 Identificación de sistemas electromecánicos	160
6.2.1 Modelos de identificación por el establecimiento de leyes físicas	163
6.2.1.1 Modelado de una articulación con un motor eléctrico	163
6.2.1.2 Ecuaciones eléctricas de un motor síncrono de imanes permanentes de campo alternativo	164
6.2.1.3 Par proporcionado por el motor	165
6.2.1.4 Pares de fricción	166
6.2.1.5 Ecuación de un eje vertical de rotación	167
6.2.1.6 Ecuación de un eje horizontal de rotación	167
6.2.2 Modelos lineales estándares	168
6.2.2.1 Modelo ARX	169
6.2.2.2 Modelo ARMAX	170
6.2.2.3 Modelo Error de salida	171
6.2.2.4 Modelo Box-Jenkins	171
6.2.2.5 Validación del modelo	172
6.3 Identificación de los ejes del robot	174

7. Control de robots escaladores	187
7.1 Introducción	187
7.2 Control de robots	189
7.2.1 Control monoarticular	190
7.2.1.1 Control PD	191
7.2.1.2 Control PID	193
7.2.1.3 Control por realimentación de variables de estado	196
7.2.1.4 Control PD con compensación de gravedad	197
7.2.1.5 Control PID con prealimentación de velocidad y aceleración	199
7.2.2 Control multiarticular	201
7.2.2.1 Desacoplamiento por inversión del modelo	201
7.2.3 Control adaptativo	204
7.2.3.1 Control MRAC	205
7.2.3.2 Control con regulador autoajutable	206
7.2.3.3 Control con planificación de ganancias	207
7.2.3.3.1 Control PD adaptativo en función de la gravedad	209
7.3 Control del robot escalador ROMA y conclusiones sobre los demás controles	210
7.4 control del robot ROMA y resultados experimentales	214
7.4.1 Motor 1 y 8	216
7.4.2 Motor 2 y 7	217
7.4.3 Motor 3 y 6	219
7.4.4 Motor 4	221
7.4.5 Motor 5	223
7.4.6 Control de posición mediante realimentación del estado	224
7.4.7 Control del par de las pinzas	226
7.5 Consideraciones finales	228
 8. Conclusiones	 231
8.1 Conclusiones	231
8.2 Trabajos futuros	235
 Bibliografía	 237

Lista de figuras

Figura 2.1	Clasificación de robots según el entorno de movimiento	12
Figura 2.2	Base de los robots a) ROBICEN y b) MACS	14
Figura 2.3	Robot SADIE	16
Figura 2.4	Dibujo del robot SFR II limpiando una fachada	17
Figura 2.5	Construcción de un muro de contención a) manualmente b) con ayuda de robots	17
Figura 2.6	Robot MACS I, realizando una tarea de inspección	18
Figura 2.7	Robot de intervención rápida	19
Figura 2.8	Robot ascendiendo por una tubería	20
Figura 2.9	Pared y suelo	21
Figura 2.10	Robot SCOUR	21
Figura 2.11	Robot ROBUG II	22
Figura 2.12	Estructura de un edificio	23

Figura 2.13	Estructura de un puente	23
Figura 2.14	Esquema de una ventosa de vacío	24
Figura 2.15	Alzado y planta del robot DISK_ROVER	25
Figura 2.16	Robot MARK I sujetándose con abrazaderas a una tubería	26
Figura 2.17	Robot Mod-I	31
Figura 2.18	Robot Ninjya	32
Figura 2.19	Robot propulsado con hélices	33
Figura 2.20	Robot Ninja-II	34
Figura 2.21	Disk Rover	34
Figura 2.22	Robot Construido por la Kajima Corp.	35
Figura 2.23	Robot MACS-I	36
Figura 2.24	Robot Libra	37
Figura 2.25	Robot trabajando en una estructura tridimensional. a) Simulación, y b) foto real	38
Figura 2.26	Robot Nero	40
Figura 2.27	Robot Tribot	40
Figura 2.28	Robug III	42
Figura 2.29	ROBUG IV	43
Figura 2.30	a) Sistema de limpieza de fachadas, y b) Vista detallada del robot SFR II	45
Figura 2.31	Robot Surfy	46
Figura 2.32	Robots Robicen -I, -II, -III	47
Figura 2.33	Robot REST	48
Figura 2.34	Robot TREPA	49
Figura 3.1	Estructura de un cocodrilo	56
Figura 3.2	Estructura de un mamífero	58
Figura 3.3	Perezoso colgado de una rama	58
Figura 3.4	Estructura de un insecto	59
Figura 3.5	Disposición de los momentos producidos en las patas de un insecto	61
Figura 3.6	Diferentes longitudes de piernas según el tipo de apoyo	64
Figura 3.7	Diferentes rangos de apertura según el punto de inserción del músculo	65
Figura 3.8	Fuerzas producidas durante el movimiento	67
Figura 3.9	Fuerzas de entrelazado	69
Figura 3.10	Manos (arriba) y pies (abajo) de diferentes animales escaladores	76
Figura 3.11	Ventosas de vacío de un murciélago	77
Figura 3.12	Laminillas de la piel de una garra de un geco	79
Figura 4.1	Esquema de metodología de diseño	89
Figura 4.2	Perfil en doble T	92
Figura 4.3	Puente con diversos defectos	93
Figura 4.4	Imagen real de una grieta	93
Figura 4.5	Configuración “pinzas”	94
Figura 4.6	Configuración “araña”	95
Figura 4.7	Configuración “oruga”	96
Figura 4.8	Configuración “triciclo”	97

Figura 4.9	Configuraciones elegidas: a) Robot con aros, b) Robot con pinzas	99
Figura 4.10	Desplazamiento sobre una viga	101
Figura 4.11	Desplazamientos sobre una viga	102
Figura 4.12	Cambio de una viga a una columna	102
Figura 4.13	Desplazamiento en dos dimensiones	103
Figura 4.14	Desplazamiento en tres dimensiones	103
Figura 4.15	Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot ROMA: a) brazo delantero libre, b) brazo trasero libre	104
Figura 4.16	Parámetros que definen el ancho y longitud del robot en función del cambio de viga	108
Figura 4.17	a) Modelo de robot usado en el simulador ADAMS b) Secuencia de movimiento	110
Figura 4.18	Curva de par en una elevación de 45°	110
Figura 4.19	Par proporcionado por los motores de la familia Baldor en función del peso del robot	112
Figura 4.20	Detalle de las pinzas del robot ROMA	115
Figura 4.21	Robot sujeto a una columna	117
Figura 4.22	Robot sujeto con una sola pinza. Esquema de fuerzas	119
Figura 4.23	Esquema hardware básico de conexión de un motor	122
Figura 4.24	Esquema general hardware del robot ROMA	123
Figura 4.25	Bucle de regulación del amplificador	125
Figura 4.26	Cámara y telémetro láser	129
Figura 4.27	Robot ROMA	130
Figura 4.28	Vista general del robot ROMA	130
Figura 5.1	Visión general	133
Figura 5.2	Arquitectura general de control	134
Figura 5.3	Control PID de una articulación	136
Figura 5.4	Esquema general de la CPU del robot	141
Figura 5.5	Transformación de las ordenes	141
Figura 5.6	Interfaz principal	143
Figura 5.7	Módulos de la interfaz	145
Figura 5.8	Ventana de teleoperación	146
Figura 5.9	Ventana de programación	147
Figura 5.10	Definición de una estructura y una tarea a realizar en ella	148
Figura 5.11	Ventana de mantenimiento	149
Figura 5.12	Medidas de seguridad mecánicas	153
Figura 5.13	Medidas de seguridad eléctricas y electrónicas	154
Figura 5.14	Medidas de seguridad software	155
Figura 6.1	Ciclo del proceso de identificación	162
Figura 6.2	Regulación de un motor <i>AC brushless</i>	165
Figura 6.3	Modelo del par de fricción estática y viscosa	166
Figura 6.4	Modelo de identificación ARX	170
Figura 6.5	Modelo de identificación ARMAX	170

Figura 6.6	Modelo de identificación de error de salida	171
Figura 6.7	Modelo de identificación de Box-Jenkins	172
Figura 6.8	Disposición de los motores del robot ROMA	175
Figura 6.9	Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 1	178
Figura 6.10	Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 2	179
Figura 6.11	Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 3	179
Figura 6.12	Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 4	180
Figura 6.13	Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 5	180
Figura 6.14	Velocidad del sistema real y modelado del motor 1 abriendo la pinza	183
Figura 6.15	Velocidad del sistema real y modelado del motor 1 cerrando la pinza	184
Figura 6.16	Velocidad del sistema real y modelado del motor 2 con un escalón positivo	184
Figura 6.17	Velocidad del sistema real y modelado del motor 2 con un escalón negativo	185
Figura 7.1	Control PD realimentado monoarticular	191
Figura 7.2	Control PID realimentado monoarticular	193
Figura 7.3	Control por realimentación del estado	196
Figura 7.4	Control por realimentación del estado con acción integradora	197
Figura 7.5	Control PD realimentado con compensación de gravedad	198
Figura 7.6	Control PID con prealimentación de velocidad y aceleración	199
Figura 7.7	Control por desacoplamiento por inversión del modelo	202
Figura 7.8	Control adaptativo MRAC	206
Figura 7.9	Control adaptativo con regulador autoajutable	207
Figura 7.10	Control adaptativo con planificación de ganancias	208
Figura 7.11	Control PD adaptativo en función de la gravedad	209
Figura 7.12	Esquema de control PID adaptativo en función de la gravedad con prealimentación de velocidad y aceleración	214
Figura 7.13	Posición real y comandada del motor 1 usando un perfil de velocidad trapezoidal	216
Figura 7.14	Error entre la posición real y la comandada del motor 1	217
Figura 7.15	Posición real y comandada del motor 2 moviendo una pinza, usando un perfil de velocidad trapezoidal	218
Figura 7.16	Error entre la posición real y la comandada del motor 2	219
Figura 7.17	Posición real y comandada del motor 3 moviendo una pinza	220
Figura 7.18	Error entre la posición real y la comandada del motor 3	221
Figura 7.19	Posición real y comandada del motor 4	222
Figura 7.20	Error entre la posición real y la comandada del motor 4	222
Figura 7.21	Posición real y comandada del motor 5	223
Figura 7.22	Error entre la posición real y la comandada del motor 5	224
Figura 7.23	Posición y error de posición del motor 8 con realimentación de estado	225
Figura 7.24	Posición y error de posición del motor 7 con realimentación de estado	225
Figura 7.25	Posición y error de posición del motor 6 con realimentación de estado	226
Figura 7.26	Gráfica tensión-fuerza con la pinza cercana al punto de apriete	229
Figura 7.27	Gráfica tensión-fuerza con la pinza totalmente abierta	229

Lista de tablas

Tabla 1.1	Características principales de los robots presentados en este capítulo	51
Tabla 3.1	Rangos de las articulaciones de una cucaracha	60
Tabla 3.2	Dimensiones de las patas de una cucaracha	60
Tabla 3.3	Características principales de locomoción	80
Tabla 3.4	Características principales de agarre	80
Tabla 4.1	Entornos y aplicaciones más usuales para un robot que se mueva en estructuras tridimensionales.	91
Tabla 4.2	Valores máximos y mínimos del perfil de una viga	93
Tabla 4.3	Parámetros de Denavit-Hartenberg	105
Tabla 4.4	Ancho máximo del robot en función de la distancia entre los ejes de elevación del robot	109

Tabla 4.5	Propiedades características de los motores	113
Tabla 4.6	Características principales de los reductores	114
Tabla 5.1	Lenguaje de programación	151
Tabla 6.1	Coeficientes del motor 1	177
Tabla 6.2	Coeficientes del motor 2	177
Tabla 6.3	Coeficientes del motor 4	177
Tabla 6.4	Coeficientes del motor 3	177
Tabla 6.5	Coeficientes del motor 5	178
Tabla 6.6	Identificación por el método ARX y OE con pinza abriendo	181
Tabla 6.7	Identificación por el método ARX con pinza cerrando	182
Tabla 6.8	Identificación del motor 2 con el método ARX y OE	182
Tabla 6.9	Identificación del motor 2 con el método ARX y OE	183
Tabla 7.1	Tabla de ganancias del motor 1 cerrando y abriendo la pinza	216
Tabla 7.2	Tabla de ganancias del motor 2 moviendo solo una pinza	217
Tabla 7.3	Tabla de ganancias del motor 2 girando todo el cuerpo y el brazo suelto	218
Tabla 7.4	Tabla de ganancias del motor 3 levantando una pinza	219
Tabla 7.5	Tabla de ganancias del motor 3 levantando el cuerpo y la pinza que queda suelta	220
Tabla 7.6	Tabla de ganancias del motor 4	221
Tabla 7.7	Tabla de ganancias del motor 5	223

Introducción

1

1.1 Motivación

Las industrias no manufactureras tales como las de la construcción, naval, petroquímica, o aeronáutica exigen, cada vez con más insistencia, aumentar su grado de automatización. En estas industrias se realizan multitud de tareas no convencionales, en entornos bastante complejos. Estos entornos son normalmente estructuras metálicas o de hormigón de grandes dimensiones con formas geométricas muy diferentes. Las operaciones que se acometen en todas estas obras suelen tener un bajo nivel de estandarización en sus tareas, por lo que no es posible usar los robots industriales habituales. Por esta razón, el desarrollo de nuevos robots específicos



para estas industrias se ha incrementado en los últimos años, y cada vez son más los centros de investigación que se dedican a esta labor.

La mayoría de las operaciones que se realizan en estas obras suelen estar relacionadas con tareas de supervisión, inspección y mantenimiento. Hoy en día, estos trabajos se realizan por medio de operarios cualificados, que usan herramientas manuales. Los trabajadores no tienen un puesto fijo en la obra sino que se tienen que desplazar por toda ésta, y muchas veces, el acceso a ciertas zonas no es nada fácil. Un ejemplo de esta clase de trabajadores, son los pintores de la torre Eiffel, o del Golden Gate, quienes deben moverse por toda la estructura para poder conseguir su cometido.

El modo de acceso a las distintas zonas verticales de una obra, por ejemplo un edificio o un puente, depende de la configuración de la estructura. El método más usado es el andamio, que es adaptable a la mayoría de las estructuras, pero su transporte y montaje suele ser siempre una tarea engorrosa y complicada. Además, es un trabajo que debe ser hecho por personas especializadas en esta tarea. En ocasiones, puede ocurrir que el coste de montaje del andamio sea mucho mayor que el coste real de la reparación que se quiera hacer, convirtiendo de esta manera la operación en algo excesivamente costoso.

Otro método para llegar a cualquier zona de la estructura es usar plataformas hidráulicas. Su mayor ventaja, es que a través de ellas, hay un rápido acceso a los lugares de trabajo y a las zonas difíciles de alcanzar; la base de la plataforma debe apoyarse en un sitio plano y estable, y además su alquiler es relativamente costoso. Una técnica más moderna es la utilización de góndolas, tal y como se usan en los edificios muy altos para la limpieza de cristales. En casos especiales se busca la ayuda de técnicas de montañismo para poder alcanzar zonas que no son accesibles por ninguno de los otros tres métodos. Estos últimos son muy costosos y requieren el trabajo de personas muy especializadas.

Por otro lado, las herramientas que se usan para realizar las tareas de inspección y mantenimiento son cada vez más pequeñas, y capaces de almacenar gran cantidad de datos y

tratarlos adecuadamente para que sean fácilmente procesados en un computador, incluso en tiempo real. Las tareas son muy repetitivas y cíclicas, en las que al final puede bajar la calidad del trabajo conforme aparezca la fatiga en un operario que lleve muchas horas trabajando en condiciones nada favorables.

Gran parte de estas operaciones son susceptibles de automatizar y ejecutar con un robot, tal y como propone Radevsky [Radevsky, 88]. Los robots industriales convencionales están diseñados para trabajar en entornos altamente estructurados, por lo que no son los más adecuados para resolver este tipo de problemas. De aquí, surge la necesidad de crear otro tipo de robots que sirvan para trabajar en estos nuevos escenarios.

Este tipo de robots debe estar dotado de una gran capacidad de movimiento en entornos 3D. Normalmente combinan en su cinemática elementos de robots manipuladores y robots móviles, teniendo algunos elementos comunes con los denominados "manipuladores móviles". Su estructura es normalmente "auto-portante", lo que les permite "escalar" o "trepar" sobre los entornos 3D. En la literatura anglosajona referente a este campo, reciben el nombre de "*climbing robots*". Desde el punto de vista de las aplicaciones que se pueden llevar a cabo se encuentran en la frontera entre los nuevos robots industriales y los robots de servicio, lo que les hace especialmente flexibles para una gran diversidad de tareas. No obstante, hay que lamentar la no existencia de este tipo de robots en el mercado.

Por supuesto, no todas las tareas que se llevan a cabo en estas industrias pueden ser automatizadas, ni siquiera conseguir que un único robot sea capaz de realizar todas las que se pueden automatizar. Son varios y diversos los entornos y las tareas que los robots auto-portantes sí pueden realizar en las mencionadas industrias. Por ejemplo, la industria de la construcción se divide tradicionalmente en dos grandes sectores: edificación y obra civil. Los robots para el sector de la edificación deben ser capaces de: inspeccionar las uniones y soldaduras de las estructuras metálicas de los edificios; realizar una inspección y limpieza de los cerramientos externos (fachadas) de los edificios, etc. En el sector de la obra civil, las aplicaciones más comunes son la inspección y pintura de puentes de estructura metálica o de hormigón. En la

industria naval, la inspección de las uniones de la estructura de los buques es de suma importancia, así como el control dimensional de los mismos. En la industria petroquímica, tiene gran interés la inspección y mantenimiento de complejos petroquímicos y la supervisión de los trabajos de construcción de plataformas de prospección marina.

1.2 Tema e importancia de la tesis

Esta tesis se centra en el campo de los robots escaladores. Más concretamente, en el problema de diseño y control de robots escaladores capaces de moverse con un cierto nivel de autonomía en entornos tridimensionales.

Aunque hay un buen número de publicaciones sobre el diseño de diferentes prototipos de robots escaladores, pero no ocurre lo mismo con su control, e incluso con el desarrollo de robots para entornos tridimensionales. La mayoría de los robots existentes son prototipos realizados por universidades e institutos de investigación públicos. Son muy pocas las empresas privadas que dedican parte de sus fondos en investigación a crear robots “escaladores”. Pese a ello, existe un notable interés por la incorporación de robots de este tipo, al mundo de la industria de la construcción, naval y aeroespacial, en la que pueden ser considerados como pieza clave. Es por ello por lo que durante los últimos años se ha incrementado el número de diferentes diseños, para resolver distintas aplicaciones.

El desarrollo de este trabajo pretende ofrecer una solución al problema de la elección e implantación de una arquitectura de control óptima para este tipo de robots, y especialmente para los que se mueven en estructuras tridimensionales. En el se incluye desde la elección más apropiada del equipo hardware de control, hasta la elección de la estrategia de control más adecuada para un robot de este estilo. También se hacen ciertas consideraciones sobre el diseño cinemático y mecánico sobre esta clase robots.

Los resultados de este trabajo se ven plasmados en un robot capaz de moverse por estructuras tridimensionales destinado a tareas de inspección en la industria de la construcción. La creación de este robot está enmarcada en el proyecto titulado “Desarrollo de un robot multifuncional auto-portable dotado de movilidad en entornos complejos (ROMA)” financiado por la CICYT, TAP95-0088 que fue concedido al Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid en el año 1995.

Este trabajo pretende abarcar los aspectos relativos al diseño e implantación de la arquitectura y estrategia de control adecuada para los robots indicados. Esto incluye la selección y modelización de los actuadores del robot, los sistemas de control para ellos y su integración en robots reales. Finalmente, los resultados obtenidos son presentados y analizados. También forma parte de la tesis la definición de la arquitectura, tanto hardware como software del sistema de control del robot, incluyendo un lenguaje programación de alto nivel propuesto para este tipo de robots y una interfaz gráfica que permita la interacción con el sistema de control del robot y un manejo sencillo de este.

1.3 Objetivos de la tesis. Estructura

En el capítulo 2 se hace una revisión de los robots escaladores que se han desarrollado en los últimos años, en los principales centros de investigación de todo el mundo. Se enumeran las distintas aplicaciones en las que puede ser útil la intervención de estos robots. Se han contemplado las diferentes superficies sobre las que se mueven los robots escaladores, que tipo de sujeción se puede usar y que clase de accionamientos son los adecuados en función de los elementos de sujeción.

En el capítulo 3 se presentan las distintas adaptaciones que tienen los animales escaladores para agarrarse y moverse sobre un árbol, o en cualquier superficie vertical. Se ha hecho un análisis de las diferencias entre las adaptaciones de un ser vivo y de una máquina a la hora de escalar, viendo los aspectos que pueden ser interesantes de un lado u otro.

En el capítulo 4 se han propuesto diferentes tipos de robots escaladores capaces de moverse en entornos tridimensionales. Se muestra el diseño del robot elegido, realizando un análisis detallado de su estructura mecánica, eléctrica y la arquitectura *hardware* de control que se ha implementado.

El sistema de control implementado, se expone en el capítulo 5. Su uso se puede hacer extensible a cualquier robot escalador, ya que se han solucionado problemas generales que se pueden plantear en cualquier robot de este tipo.

En el capítulo 6 se tratan los diferentes métodos de identificación que se pueden aplicar a las diferentes articulaciones del robot ROMA. Hay que destacar la importancia que tiene el efecto de la gravedad en un robot escalador, por lo que se han usado métodos de identificación que tienen en cuenta dicho efecto.

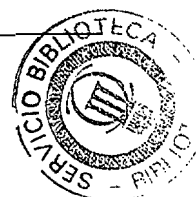
El capítulo 7 describe las diferentes técnicas de control que se han empleado en los robots tradicionales, cuáles han sido las utilizadas en los robots escaladores hasta ahora, y cuál es la que se propone en el texto de esta tesis. Finalmente se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de esta técnica.

El capítulo 8 contiene los resultados finales y conclusiones de esta tesis, con una mención especial de las aportaciones realizadas y los trabajos futuros que pueda originar.

Robots escaladores

2.1 Introducción

La capacidad del hombre, a lo largo de toda la historia, de enfrentarse a nuevos retos y buscar soluciones es innegable; su curiosidad, sus ganas de resolver nuevos problemas, y su afán de superación es algo consustancial a él. En el campo de la robótica, una vez tratado a fondo el estudio de los robots en entornos estructurados, ha surgido la necesidad de crear máquinas que ayuden al hombre a realizar trabajos en los no estructurados (centrales nucleares, edificios, minas, puentes, etc.); tareas en las que no es viable usar un robot industrial tradicional. La tecnología actual permite empezar a abordar este tipo de problemas fabricando máquinas, que faciliten la labor del hombre en ambientes muy peligrosos.



Estas nuevas máquinas tienen que tener la capacidad de desplazarse por toda la zona de trabajo. Esta característica se convierte, a veces, en el principal problema de su diseño. Si lo que se quiere es trabajar sobre la fachada de un edificio, la estructura de un puente, o un depósito, el robot debe "escalar" por dichas superficies.

A la hora de diseñar un robot escalador, es muy importante tener en cuenta sobre que superficie se va a mover puesto que: su cinemática dependerá, en gran medida, de la forma que tengan dichas superficies (paredes planas, curvas, techos, vigas o columnas, etc.). En función de los materiales con que se hayan construido, los elementos de sujeción también serán distintos; no serán los mismos para subir por una estructura metálica que por un edificio de cristales, por ejemplo.

Un robot móvil, que use como sistema de locomoción las ruedas, puede moverse por cualquier superficie plana horizontal, o con una pequeña pendiente. Las fuerzas de reacción de las ruedas contra el suelo le ayudan a que no se desplome, y las fuerzas de rozamiento entre ruedas y suelo le facilitan el desplazamiento por la superficie plana.

Si el terreno es demasiado irregular: piedras, grietas, cauces de ríos, taludes, etc. provocando que la superficie de movimiento no sea plana, entonces, las ruedas no son el mecanismo de locomoción más adecuado, ya que no ayudan a la máquina a salvar los accidentes orográficos; por tanto, habrá que usar métodos distintos. Una solución es usar orugas, como hacen los robots móviles que se mueven por entornos exteriores. A veces hay obstáculos que ni siquiera pueden ser salvados por las orugas: escalones empinados, pequeñas vallas, etc. En estos casos el único recurso es dotar al robot de patas. Las fuerzas que sostienen a los robots con patas son las mismas que las de robots con ruedas, y el principio físico de movimiento también se basa en las fuerzas de rozamiento.

Cuando la inclinación del terreno aumenta, el efecto de la gravedad es mucho mayor, y las fuerzas que antes eran beneficiosas para el sostén del robot ahora provocan que éste se pueda caer. La fuerza de gravedad ya no le ayuda a mantenerse pegado a la pared; por tanto, habrá que

diseñar mecanismos que permitan a la máquina moverse libremente por toda la superficie vertical.

Para sujetar un robot a la pared hay que hacer una fuerza suficiente que permita que se agarre bien y además, evite su deslizamiento sobre ella. De modo que, para resolver el problema, hay que tener en cuenta dos aspectos muy importantes: agarre y deslizamiento. El robot puede que se pegue bien a la superficie vertical, pero debido a la fuerza que ejerce la gravedad se deslice por la superficie, en algunos casos sin llegar a caerse, y no se quedará exactamente en la posición deseada.

2.2 Definiciones previas

Durante el texto de la tesis, aparecerán en muchas ocasiones los términos robot móvil (vehículo) y manipulador (normalmente denominado “robot”) que en este trabajo se considerarán con el mismo significado de “robot”. A continuación se va a dar una información más detallada del contenido de estos términos en este trabajo. En toda la literatura existente hay multitud de definiciones de la palabra “robot”. Una de las más conocidas es la que presenta la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) [Barrientos, 97]: *"Robot es un manipulador automático servocontrolado, reprogramable, polivalente capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material"*.

Tal y como se aprecia, la definición de AFNOR engloba perfectamente el concepto de manipulador, dotándolo de una serie de capacidades añadidas. Sin embargo, esta definición está algo restringida a lo que se conoce como un robot industrial, aunque podría ampliarse al término de robot en general indicando la posibilidad de tener un cierto grado de autonomía en la toma de

decisiones durante su operación, que correspondería a un robot de 3ª generación. Aún así esta definición no engloba totalmente al resto de robots como pueden ser los de servicio, o los robots móviles.

La IPA ha dado como definición de robot de servicio [Schraft, 94] la siguiente: *“Un robot de servicio es una cadena cinemática que se puede programar libremente, que desarrolla servicios de una forma semi- o totalmente automática. Los servicios son tareas que no contribuyen a la fabricación industrial de bienes pero son la ejecución de un trabajo útil para el hombre y sus equipos. Las tareas reales a ejecutar por los robots de servicio pueden ser diferentes maniobras complejas, que pueden ser llevados a cabo bajo situaciones imprevisibles o en distintos entornos. Un robot debe ser capaz de actuar, con ciertos límites, de forma autónoma”*. Esta definición enmarca bastante bien cuál debería ser la tarea que debe tener un robot escalador, ya que la mayoría de las tareas para las que se han creado la gran parte de estos robots es para las tareas de servicio.

Muir y Neumann dieron en 1986 la definición de un robot móvil con ruedas, [McKerrow, 91]: *“Un robot capaz de moverse sobre una superficie, únicamente a través de la actuación de las ruedas montadas en el robot y en contacto con la superficie. Una rueda es un mecanismo que proporciona o permite un movimiento relativo entre su soporte y una superficie sobre la cual se intenta tener un sólo punto de contacto de rotación”*.

Esta definición se acerca más a lo que es un robot caminante, con la única diferencia del mecanismo de contacto con la superficie y de la forma de locomoción. En la mayoría de los casos el mecanismo principal de locomoción ya no es la rueda.

Tood [Todd, 1985], indica cinco condiciones que debería tener un robot caminante:

- 1.- *Un robot debe ser una máquina y no un ser vivo. (Aunque esta regla no excluye el uso de materiales o estructuras bioquímicas artificiales, tales como músculos)*
- 2.- *Debe ser capaz de mover objetos o moverse a sí mismo, es decir, deben ser “autoportantes” (con lo que se excluye la simulación o las plantas que poseen un sistema de control)*

- 3.- *Debe tener fuerza y ser capaz de hacer movimientos programados. (Con esto, se excluyen los brazos teleoperados que sólo son capaces de repetir los movimientos que realiza un maestro dirigido por un operador)*
- 4.- *El sólo, debe ser capaz de realizar una acción continuada sin necesidad de la ayuda de agentes externos. (Así se excluyen los vehículos normales).*
- 5.- *Debe ser capaz de modificar su comportamiento en función de la información externa que reciba del entorno, con lo que debe estar equipado con sensores de alguna clase.*

Los puntos segundo y quinto son los que más diferencian a los robots industriales de los robots de servicio y en especial, de los robots móviles; deben ser capaces de desplazarse y su trayectoria puede cambiar en función de la información que es capaz de obtener del entorno.

Un robot caminante cumple con las condiciones impuestas por Todd, y además tiene que ser capaz de moverse por cualquier tipo de superficie, ya sean regulares o irregulares. Hay que hacer notar la mayor parte de la superficie terrestre es inaccesible a los robots móviles convencionales que se mueven usando ruedas u "orugas". Por tanto para moverse por dichas superficies hay que usar patas.

Un paso más es la que debe tener un robot escalador que debe cumplir otras condiciones:

- 1.- Ser capaz de subir por superficies verticales con un grado de inclinación acusado
- 2.- Sostener su propio peso para que no se caiga ni deslice.
- 3.- Moverse en cualquier dirección de cada superficie; subir, bajar, o moverse a derechas o izquierdas.

Un robot escalador tiene que cumplir con las mismas condiciones que un robot móvil o caminante, con la condición de sujetarse con un nivel alto de seguridad a la superficie una superficie vertical: una pared, una tubería, una columna, el casco de un barco o de un avión, etc.

Hasta ahora, aunque toda la comunidad científica maneja el término de robot escalador, no se ha propuesto ninguna definición. A la vista de las definiciones, y comentarios anteriores se propone que: *“Un robot escalador es una máquina móvil que puede realizar tareas de servicio, de forma programada o autónoma, capaz de soportar su peso y propulsarse a sí mismo en su entorno de trabajo, que no tiene por qué ser horizontal. La máquina debe ser capaz de conseguir un alto nivel de sujeción, para que no se caiga ni deslice, en el caso de que se mueva sobre una superficie muy inclinada”*.

La figura 2.1 muestra una clasificación de los robots que se han expuesto en este texto.

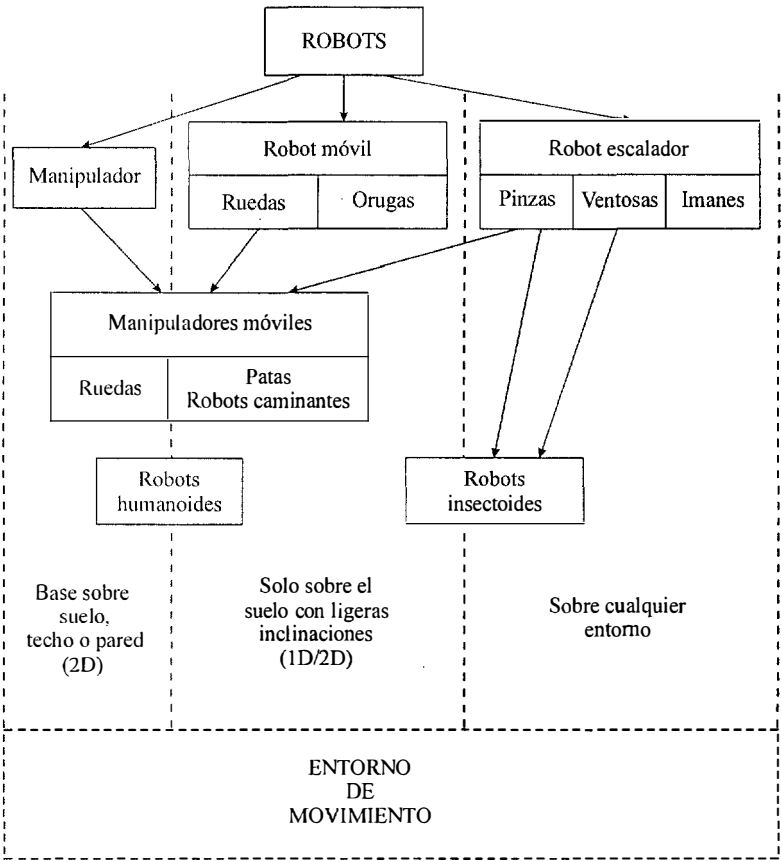


Figura 2.1 Clasificación de robots según el entorno de movimiento

Un aspecto muy importante a tener en cuenta en todos los robots caminantes, o con patas es el análisis del paso y movilidad, el modo de caminar; concepto que en la literatura

inglesa se denomina "gait". Song y Waldron, [Song, 1989], definieron el modo de caminar para robots caminantes como:

“Un modo de caminar es el movimiento combinado de las patas, lo cual puede ser definido como el instante de tiempo y la posición en que ocurre el levantamiento y la colocación de cada pata, coordinado con el movimiento del cuerpo en sus seis grados de libertad con la intención de desplazar el cuerpo de un lugar a otro”

Sin entrar muy a fondo en estudios sobre el modo de caminar de los distintos robots caminantes, se va a estudiar cuáles son algunos de los modos principales de caminar que existen, y que fueron estudiados por Song y Waldron [Song, 1994]:

"Un modo de caminar es periódico si los estados iguales de la misma pata durante sucesivas zancadas ocurren en el mismo intervalo de tiempo para las mismas patas, siendo este intervalo lo que se conoce como el tiempo de ciclo. En otro caso, el movimiento es no periódico".

Naturalmente, un modo periódico siempre será más fácil de implementar en un ordenador, ya que cada pata realiza regularmente el mismo tipo de movimiento. Dentro de estos dos modos de caminar surgen diversas variedades en cada uno de ellos, donde la selección de cada uno de ellos viene en gran parte determinada por la orografía del terreno, las necesidades de estabilidad de la máquina, su facilidad de control, especificaciones de velocidad y movilidad. Song y Waldron propusieron una clasificación muy detallada de cada uno de los modos de caminar.

En el caso del modo de caminar de los robots escaladores, que tiene ciertas diferencias con los robots caminantes, cabe destacar los trabajos de [Nagakubo, 1994], [Luk, 1993], [Briones, 94] y [Grieco Silva, 97].

En un robot caminante se pueden distinguir dos eventos:

- Levantamiento de una pata
- Apoyo de una pata

Hiroshe y Nagabuko proponen dos nuevos estados en el modo de caminar para robots escaladores [Nagabuko, 1994]:

- **Fase previa de agarre:** Tiempo transcurrido desde el contacto del pie con la superficie hasta que esté en capacidad de generar su fuerza de soporte total.
- **Fase previa de separación:** Tiempo requerido por el mecanismo de sostén para pasar de generación de máximo soporte a soporte nulo.

En un robot escalador, el tiempo que tarda en producirse el vacío en el interior de una ventosa no es instantáneo; si se usan electroimanes hay que tener en cuenta la histéresis que tienen, para determinar el tiempo que pasa hasta que se considere que la pata del robot se ha agarrado bien. Igualmente, con una pinza hace falta un tiempo hasta que la pinza se acople y agarre bien a la columna de una estructura.

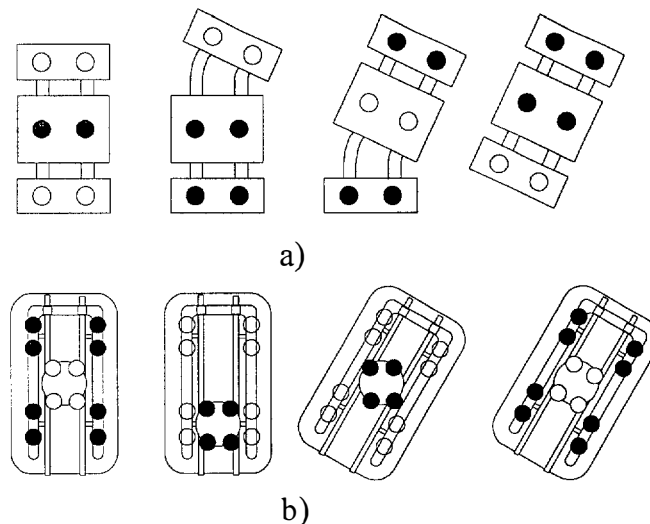


Figura 2.2 Base de los robots a) ROBICEN y b) MACS

En los robots escaladores hay dos modos principales de escalado: el empleado por los de plataformas móviles, y el que usan los que tienen patas; el primer modo se distingue por un movimiento relativo entre las diversas partes que componen el robot escalador. Normalmente los mecanismos de agarre se encuentran en varias plataformas unidas por algún tipo de

articulación, que facilita el desplazamiento relativo entre ellas. Con este tipo de máquinas se consigue un modo de caminar discontinuo, cuyas fases vienen determinadas por la secuencia en los accionamientos de los dispositivos de sujeción y de los actuadores de movimiento, que son de traslación y rotación. Puede ocurrir que los movimientos de rotación se hagan por las mismas articulaciones que realizan los de traslación, como es el caso del ROBICEN, o por distintos actuadores y articulaciones, MACS I.; robots que se verán más adelante. Los dos casos aparecen reflejados en la figura 2.2, donde se pueden ver las bases de los dos robots. Los accionamientos que aparecen en negro son los que están sujetos a la pared y los de color claro los que están sueltos, y por tanto su plataforma correspondiente puede moverse libremente.

Los robots con patas tienen también movimientos traslacionales, giratorios y de cambios de superficie. El modo de caminar traslacionalmente es muy parecido al de plataforma móvil.

2.3 Campos de aplicación y tareas

Hay multitud de sectores industriales en los que todavía, el nivel de automatización es bajo. Sin embargo, con el avance de las nuevas tecnologías, estas industrias empiezan a descubrir multitud de tareas en las que se pueden facilitar los trabajos que se llevan a cabo, incluso llegando a su automatización completa en algunos de ellos.

Se han realizado muchos estudios cuyo objetivo es encontrar cuáles son los sectores, y dentro de cada uno de ellos, las tareas que cuentan con mayor posibilidad de incrementar su grado de automatización. La mayor parte de las operaciones expuestas en este apartado ha sido recogidas de informes generados por la red temática europea, CLAWAR; organización dedicada a reunir todas las empresas y grupos de investigación relacionadas con el diseño y desarrollo de robots caminantes y escaladores. Dicha organización, en una de sus primeras fases, ha identificado los sectores industriales que podrían integrar el uso de estos robots en sus tareas convencionales:

- La industria nuclear ha sido una de las pioneras en la utilización de vehículos que escalan por paredes, especialmente para trabajar en ambientes de atmósfera contaminada; la necesidad de vehículos de inspección y mantenimiento para esta industria sigue siendo crucial en el desarrollo de esta tecnología, ya que el ambiente nuclear demanda operaciones remotas de mantenimiento. En un futuro, conforme las plantas vayan envejeciendo y termine su ciclo de vida, aparecerán numerosas tareas de desmantelamiento, donde el uso de esta clase de robots será muy beneficioso, [Browning, 99]. Tal es el caso del robot SCOUR, o del robot SADIE [White, 98] que realiza la inspección en los conductos que aparece en la figura 2.3.

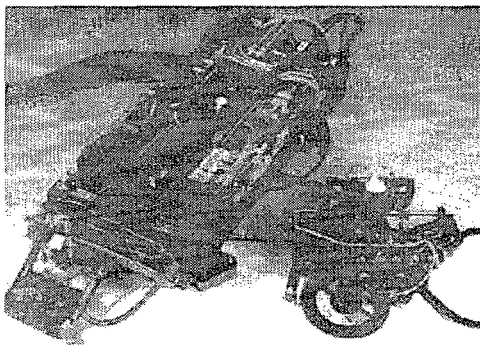


Figura 2.3 Robot SADIE

- La industria de la construcción es otra de las primeras beneficiadas de esta clase de robots [Radevsky, 88]. Ya existen multitud de prototipos capaces de realizar operaciones de inspección, buscando distintos defectos de diverso origen, en la fachada o estructura de un edificio. También hay prototipos que poseen capacidad para operaciones de mantenimiento tales como limpiar ventanas, o pintar estructuras. Con estos vehículos se puede rebajar el coste del proyecto y el fatigoso montaje de andamios en las operaciones de renovación en los edificios. El Instituto para los Problemas en Mecánica ruso, el Instituto Fraunhofer de la ingeniería de fabricación y la automática (IPA) de Alemania, la Universidad de Miyazaki (Japón), o la empresa inglesa PORTECH Ltd. han desarrollado diferentes aplicaciones para este sector [Waterman, 99]. La figura 2.4 muestra un robot

dedicado a la limpieza de cristales en las fachadas de edificios diseñado por el instituto alemán.

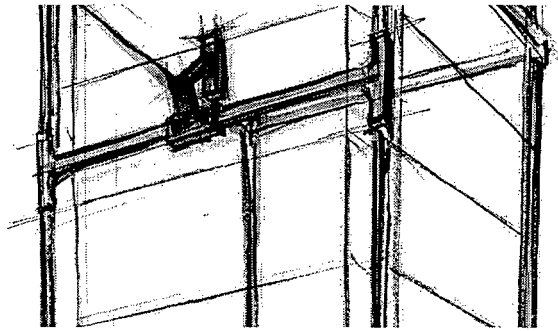
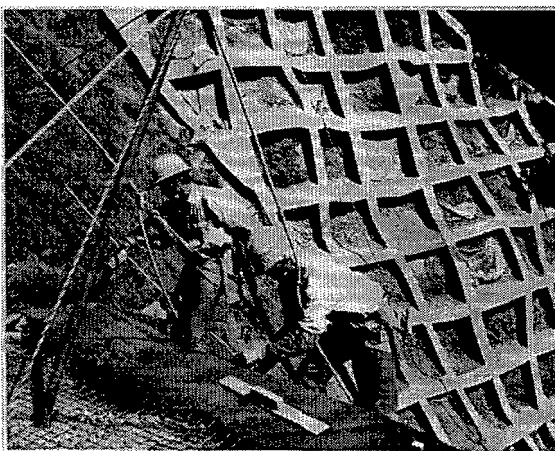
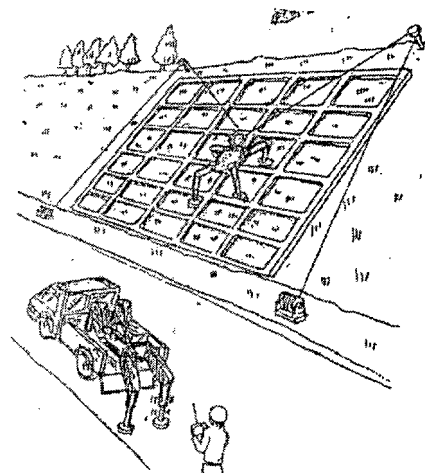


Figura 2.4 Dibujo del robot SFR II limpiando una fachada

- La industria civil cuenta con los mismos trabajos y tareas que los de la construcción, con lo que es muy fácil diseñar un vehículo que sirva para los dos sectores. Los puentes metálicos necesitan una inspección periódica de la estructura, y necesitan ser pintados bastante a menudo. Una máquina escaladora sería un buen utensilio para inspeccionar o arreglar la pared de una presa o de un muro de contención, tal y como aparece en la figura 2.5 [Tsukagoshi, 98].



a)



b)

Figura 2.5 Construcción de un muro de contención a) manualmente b) con ayuda de robots

- La industria petroquímica se podría beneficiar particularmente de los escaladores; para cumplir con el trabajo de mantenimiento sobre la torre de perforación (plataforma petrolífera), y con un diseño adecuado incluso se puede inspeccionar la parte que está sumergida.
- En el mismo caso se encuentra la industria naval, para la pintura y soldadura del casco de barcos. El robot REST es un claro ejemplo de esta aplicación. La industria aeronáutica también se puede beneficiar del uso de esta clase de robots en las operaciones de montaje y mantenimiento del fuselaje de un avión. La figura 2.6 muestra al robot MACS I, desarrollado por el JPL, realizando una tarea de inspección sobre el fuselaje de un avión. Sobre el funcionamiento de los dos robots se darán más detalles en el epígrafe 2.6.

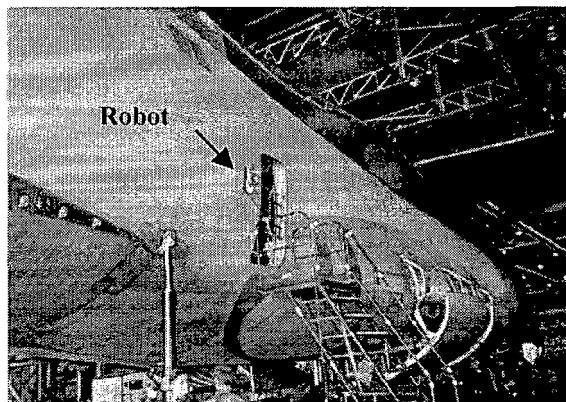


Figura 2.6 Robot MACS I, realizando una tarea de inspección

- En la industria minera existe la necesidad de un vehículo que inspeccione el daño producido por escape rápido de gas, o después de que haya ocurrido una explosión, ya que las técnicas actuales de monitorización del medio ambiente no son totalmente eficaces. Además, un vehículo capaz de escalar y subir sobre superficies no estructuradas de una mina abandonada que sirva para monitorizar los efectos de combustiones espontáneas en pasadizos abandonados, es otra de las demandas de la minería
- En la industria química; los robots pueden recoger muestras de material contaminado, realizar trabajos de inspección y reparación, dentro o fuera de un tanque grande, por

ejemplo, sin necesidad de colocar andamios ni de que ningún operador humano entre en la zona contaminada.

- En diversos servicios de emergencia, el uso de escaladores o caminantes podría ser de gran valor para entrar en áreas devastadas por el fuego o terremotos para recoger muestras, o buscar supervivientes, como es el caso del robot ideado por el profesor Akira Nishi que se muestra en la figura 2.7. Este robot está diseñado para trabajar en situaciones de emergencia, con el objetivo de llegar lo más rápido posible a la zona de operación.

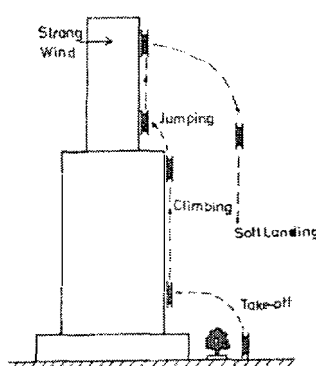


Figura 2.7 Robot de intervención rápida

- Las tuberías y conductos se reflejan como un área de investigación comercialmente viable mediante vehículos autónomos. Los escaladores pequeños pueden ser muy eficaces en la inspección, mantenimiento y limpieza de los conductos de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Los escaladores de tuberías tienen un gran valor en áreas tales como la inspección de los conductos de los desagües, industrias de construcción y del agua y la industria petroquímica donde se necesitan equipos similares. Tales robots escaladores pueden detectar fugas en las principales tuberías de agua.
- El trazado de mapas de una red de túneles y tuberías en instalaciones abandonadas y en canteras antiguas que sean inseguras para entrar, o que no haya un conocimiento exacto de ellas, también se ha identificado como un área de prioridad.

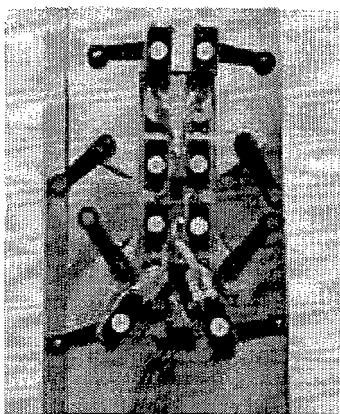


Figura 2.8 Robot ascendiendo por una tubería

2.4 Tipos de robots escaladores

Los robots escaladores se pueden clasificar en distintas familias teniendo en cuenta diferentes criterios; en función del tipo de superficie sobre la que se mueven, se puede distinguir entre: robots que andan por paredes, por suelos y paredes, y por vigas y columnas. La morfología de la superficie sobre la que se mueve el robot define claramente cuál es el dispositivo que puede sujetar al robot. Los elementos de sujeción que se pueden usar son: ventosas de vacío, electroimanes, y pinzas o abrazaderas. El robot debe desplazarse por toda la zona de trabajo, por lo que necesita contar con los accionamientos adecuados para llevar su tarea a cabo; en la mayoría de los desarrollos los dispositivos de agarre y los accionamientos que le permiten desplazarse usan la misma fuente de energía. Los accionamientos que normalmente se usan son: eléctricos, neumáticos o mixtos.

2.4.1 Clasificación según tipo de superficie

2.4.1.1 Robots que andan por suelos o paredes

Estos robots sólo se pueden mover por una sola superficie, sin ser capaces de pasar a otra. Su forma es muy parecida a la de los robots móviles convencionales cuando andan por el suelo, y al igual que estos, no pueden cambiar su posición entre dos superficies cuyos vectores

directores tengan una diferencia grande en su dirección. En cambio, cuando andan por paredes los robots no están diseñados para realizar un cambio de dirección tan grande, como la que aparece en la figura 2.9; su cinemática no les permite realizar cambios muy bruscos en ciertas direcciones en el espacio. Como se aprecia en la figura 2.10, el diseño cinemático del robot SCOUR no está adaptado para pasar del suelo a la pared, por ejemplo. El operador tiene que colocarlo en la superficie, y a partir de este momento se moverá como un robot caminante cualquiera, con la salvedad de ir por superficies verticales. Algunos prototipos pueden moverse por superficies cuya curvatura no sea demasiado acentuada, como ocurre en los casos de un depósito grande de agua o de combustible, del casco de un barco, o del fuselaje de un gran avión. [Prieto, 98], [Backes, 97].

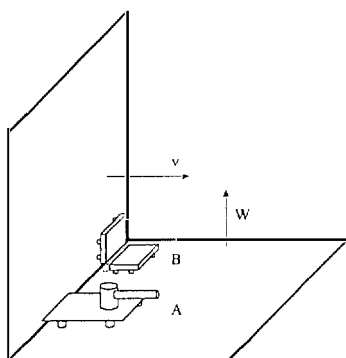


Figura 2.9 Pared y suelo

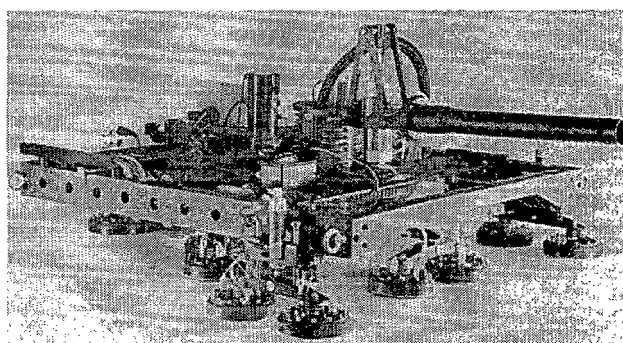


Figura 2.10 Robot SCOUR

2.4.1.2 Robots que andan por suelos y paredes

La cinemática de estos robots les permite salvar estas diferencias de orientación entre dos superficies. Un robot que vaya andando por el suelo será capaz de pasar a la pared el sólo, o de cambiar de una pared a otra, sin necesidad de ayuda alguna. Para conseguir este cambio, su diseño cinemático puede adoptar dos soluciones: tener elementos simétricos en la parte delantera y trasera, con grados de libertad suficientes que permitan a la articulación moverse en la dirección del eje z del robot, o poder doblar el cuerpo por la mitad. Ejemplos de este tipo es el robot ROBUG II, que aparece en la figura 2.11, que se desplaza por paredes y suelos. Tal y como se aprecia en la figura el cuerpo está dividido en dos partes, y las patas pueden moverse en la dirección del eje z del robot.

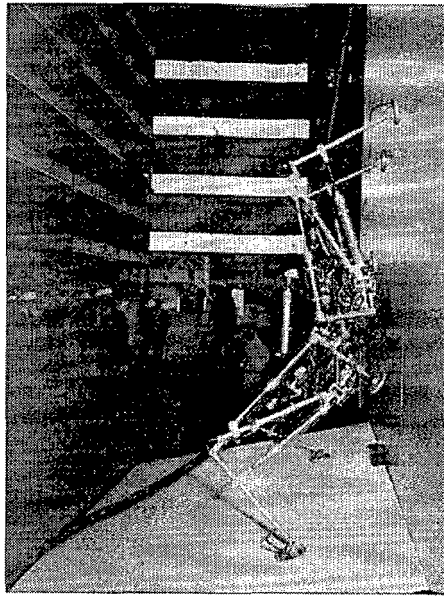


Figura 2.11 Robot ROBUG II

2.4.1.3 Robots que andan por vigas y columnas

En esta clase se pueden encuadrar los robots capaces de moverse en estructuras tridimensionales. Su cinemática tiene que ser capaz de moverse en estructuras de vigas y columnas de un edificio en construcción, en la parte metálica de un puente, como las que aparecen en las figuras 2.12 y 2.13. Un aspecto importante a tener en cuenta para diferenciar estas superficies de los tipos anteriores es que, la anchura de una viga o una columna no es comparable a la de una pared.

Para los dos primeros tipos, vistos en los dos apartados anteriores; los diseñadores se han basado en robot móviles convencionales o caminantes: en los primeros se han sustituido las ruedas por ventosas o electroimanes, y los segundos se han adaptado colocando en los extremos de las patas los elementos de sujeción. Los dos tipos de robots son demasiado anchos para moverse entre las dimensiones de una viga que pueden tener hasta un perfil de 10 mm de ancho.

Actualmente sólo hay tres robots que sean capaces de moverse en este tipo de estructuras tan concretas. El primero fue desarrollado por una constructora japonesa; Kajima,

ltd., el segundo fue diseñado por la Universidad Carnegie Mellon, y el tercero por la Universidad Carlos III de Madrid. El robot SM2 construido en la Universidad Carnegie Mellon tiene como objetivo moverse en la estructura de una futura estación espacial; por lo que, al trabajar en el espacio, no tiene que vencer la fuerza de la gravedad. La universidad de Nagoya, con la dirección del profesor Fukuda también desarrolló un robot con una estructura muy similar a los anteriores pero para desarrollar tareas de inspección en tuberías, el robot MARK III [Fukuda, 87].

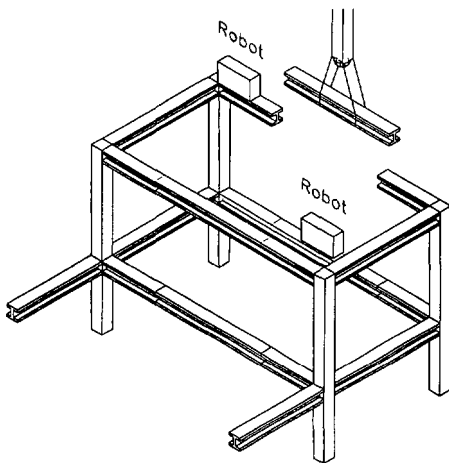


Figura 2.12 Estructura de un edificio

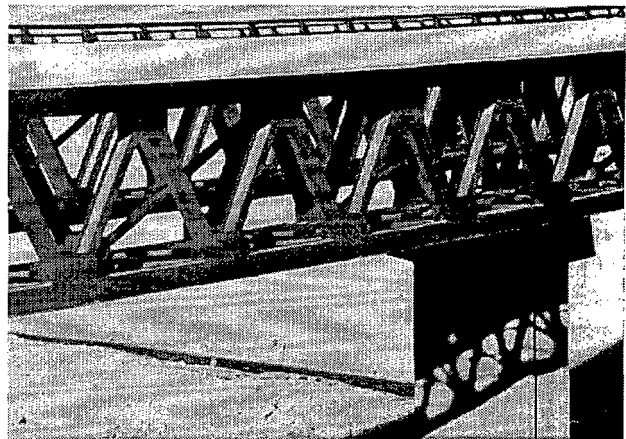


Figura 2.13 Estructura de un puente

2.4.2 Dispositivo de sujeción

Muy relacionado con el tipo de superficie por el que se mueven los robots está el método de sujeción que utilizan. Así, la forma de sujeción depende mucho de la forma de la superficie y del material con la que se haya construido. Existen tres tendencias claramente definidas a la hora de elegir la forma de sujeción o agarre.

Si la intención es crear un robot que se mueva por la fachada de un edificio o similar, se usarán ventosas de vacío exclusivamente, y esto normalmente, conduce a usar accionamientos neumáticos para mover el robot. Los primeros estudios serios en esta materia fueron realizados

en 1992 por el equipo de Gradetsky [Gradetsky, 92], quién sentó las bases teóricas en este campo.

Por otro lado, si los robots están destinados a moverse por superficies metálicas no pintadas, como cascos de barcos o aviones, los diseñadores, normalmente, suelen decantarse por imanes como sistema de sujeción. Este es el caso de los robots que escalan por la superficie de barcos, desarrollados por el IAI en España y el CSIRO en Australia. Otra característica común de este tipo de robots es su gran peso debido al uso de electroimanes, lo que conlleva una baja maniobrabilidad. Esta tendencia tiene también serias limitaciones en el tipo de superficies por las que se desplaza el robot que se explicarán más adelante.

Por último, si se trata de una estructura tridimensional de vigas, columnas, o de tuberías, se suele usar pinzas o abrazaderas que aprieten el robot a la estructura, al igual que hacen algunos monos, o los perezosos cuando suben por un árbol.

2.4.2.1 Ventosas de vacío

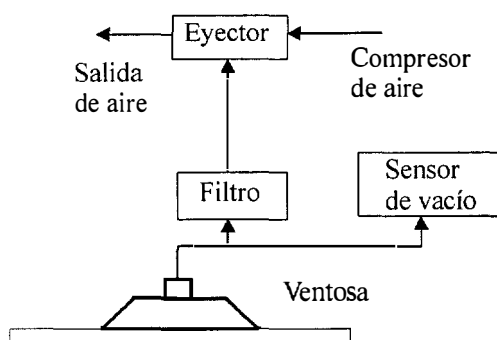


Figura 2.14 Esquema de una ventosa de vacío

Es conveniente tener en cuenta con qué material se han construido las superficies en las que el robot se va a mover. El efecto de las ventosas, para conseguir que el robot se agarre adecuadamente, depende en gran medida de la capacidad que tenga el sistema de crear vacío entre la ventosa y la superficie. Las paredes de cristal, acero, mármol, y losa son las mejores; todas tienen una característica en común, son materiales poco porosos, con lo cual, se puede conseguir un grado de vacío que llegue hasta a un 95%, valor considerado muy alto. Al

contrario, en las superficies muy porosas el nivel de vacío que se puede conseguir baja al 60% [Bach, 95], y el agarre será mucho más problemático. Normalmente todas las ventosas suelen tener junto a ellas un sensor de vacío que indique cuál es el grado de vacío que han producido para poder admitir que está ejerciendo la fuerza de agarre necesaria a su diseño. Para poder trabajar con ventosas de vacío es necesario tener un buen circuito de aire comprimido.

2.4.2.2 Electroimanes

Los electroimanes son muy útiles si se quiere usar como fuente de energía, la electricidad. El electroimán se queda agarrado a la superficie, que tiene que ser metálica, mientras no se le haga pasar una corriente a la bobina que le rodea; ya que en cuanto esto ocurre, el imán pierde sus propiedades magnéticas y se suelta de la pared. Su mayor inconveniente es que el entrehierro que se produce entre el imán y la superficie de agarre no puede ser muy grande. Así si la superficie sobre la que se va a sostener el robot está pintada, no podrá sujetarse bien a ella. El peso del electroimán, no es nada despreciable, y es algo a tener muy en cuenta en el momento de diseñar el robot.

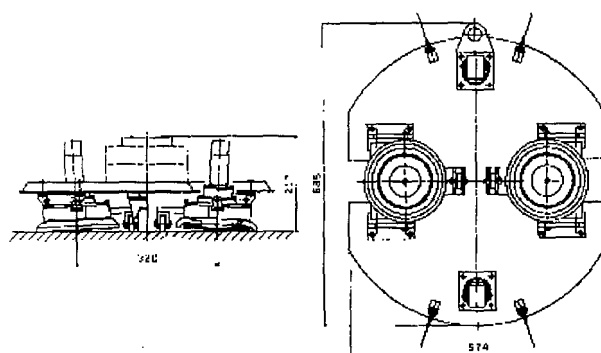


Figura 2.15 Alzado y planta del robot DISK_ROVER

Hay otras aplicaciones que se valen de imanes permanentes, pero necesitan de un mecanismo que facilite su separación de la superficie de escalado. Su fuerza de agarre es mucho mayor que la de los electroimanes, y debido a esta razón, algunas aplicaciones tienen una solución combinada de imanes y electroimanes [Sugiyama, 86]. A veces, los diseñadores han creado nuevos mecanismos para conseguir un despegue más fácil del electroimán [Hiroshie, 87].

Este es el sistema que lleva el robot DISK ROVER desarrollado por el profesor Hirose, y del que aparece un dibujo en la figura 2.15

2.4.2.3 Pinzas o abrazaderas

Las pinzas o abrazaderas consiguen agarrarse por compresión a la superficie en la que se va a mover el robot; aunque este método no sirve para sujetarse a paredes ni techos, ya que son superficies planas, pero sí es ideal para moverse por tuberías, vigas, y columnas. Las pinzas se abren y cierran con motores eléctricos o cilindros neumáticos: los accionamientos eléctricos facilitan el control de apertura y cierre de la pinza mucho mejor que los cilindros neumáticos, pudiendo actuar en cualquier momento tanto en el grado de cierre o apertura, como en la fuerza que se ejerce contra la superficie.

Con esta sujeción es muy importante saber de que está hecha la estructura, y procurar usar un material que ayude a mejorar el agarre a la columna y evitar el deslizamiento. La mayoría de los prototipos incorpora el caucho, experimentando con gomas de distintas características. Otra ventaja añadida es que no daña la viga cuando la pinza apriete sobre ella. En la figura 2.16 se puede apreciar el robot MARK I usando una abrazadera para agarrarse a una tubería [Fukuda, 99]

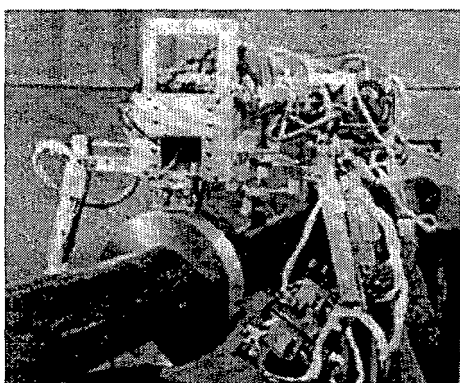


Figura 2.16 Robot MARK I sujetándose con abrazaderas a una tubería

Para ayudar a conseguir un mejor agarre en un robot que utiliza pinzas o ventosas de vacío se pueden colocar adhesivos en las ventosas, con lo que se mejora la estanqueidad para

producir el vacío, y a su vez habrá una pequeña fuerza de adhesión a la pared. Esta misma fuerza es útil en el caso de tener pinzas, y le ayuda a que no deslice cuando se está sujetando a una superficie vertical. Es importante tener en cuenta que el uso de adhesivos solo sirve de ayuda a los tres dispositivos principales: ventosas de vacío, electroimanes y pinzas, pero un adhesivo no es capaz el sólo de aguantar a un robot pegado a la pared.

2.4.3 Tipo de accionamiento

Los accionamientos que usan los robots están en consonancia con el tipo de agarre que tengan. Si la sujeción se realiza mediante ventosas de vacío, el aire comprimido se puede utilizar si se instalan cilindros neumáticos. Si se prefieren los electroimanes, lo más sencillo es colocar motores eléctricos. Los accionamientos hidráulicos, bastante utilizados en los robots convencionales, no se suelen usar en los escaladores debido al gran peso que aportarían a la estructura final del robot. Hay que decir también, que se han construido algunos que tienen como fuente de energía un motor de combustión interna, pero no es una técnica de uso extendido.

2.4.3.1 Eléctrico

Los robots que se sujetan con electroimanes necesitan energía eléctrica para actuar sobre ellos. Ya que al robot le llega energía eléctrica, la aprovechan para los actuadores encargados de desplazar el robot a lo largo de la superficie; usan motores eléctricos de corriente continua, o motores de corriente alterna. No hay que desdeñar el peso de estos motores a la hora de diseñar el robot. Por esta razón es interesante elegir motores que tengan una buena relación potencia-peso. Los motores eléctricos tienen una gran ventaja: son accionadores que se pueden controlar mucho mejor que los accionamientos neumáticos.

2.4.3.2 Neumático

Los robots que tienen como fuente de energía el aire comprimido, lo utilizan en las ventosas y en los accionamientos que le sirven para moverse por la superficie, y normalmente incorporan cilindros neumáticos y electroválvulas. Con este tipo de accionadores el control de

posición que se puede hacer del robot no es tan preciso como en el caso de los accionamientos eléctricos, pero en cambio, el peso de los accionamientos neumáticos es mucho menor que el de los eléctricos.

2.4.3.3 Mixto

Hay robots que aprovechan las dos fuentes de energía y tienen accionamientos neumáticos y eléctricos. Robots que se mueven por paredes usando ventosas para sujetarse y motores eléctricos para moverse.

2.5 Control de robots escaladores

Hasta ahora la mayor preocupación de los diseñadores de robots escaladores era conseguir máquinas que pesasen poco y se pegaran bien a la pared. Todos los esfuerzos se centraron en diseñar una cinemática adecuada y unos dispositivos de agarre que tuviesen una gran fiabilidad. Por esta razón el control de los robots suele ser bastante sencillo, ya que todavía no se le ha dedicado el tiempo que merece.

Se han planteado tres grandes problemas en el control de estas máquinas: el primero viene derivado del campo de los robots caminantes, es el control del paso del robot. El segundo y el tercero son propios de los robots escaladores: uno es el control de agarre, y por último, y no por eso en este lugar, la seguridad.

Sobre el control del paso, tal y como se explicó en el epígrafe 2.2, se han realizado diferentes trabajos en los que se ha aplicado el control de todo lo contemplado hasta ahora en el campo de los robots caminantes al de los escaladores, teniendo en cuenta la diferencia que hay entre ellos, por supuesto.

Otro gran problema es el control del agarre a la superficie por la que se mueve el robot, sobre todo cuando se trata de una superficie vertical o del techo. Es muy importante, por razones

de seguridad sobre todo, un buen control de la fase previa de agarre, de la fuerza durante el agarre, y de la fase de separación de cada elemento de sujeción. Cuando una pata se agarra a la superficie, hay que comprobar que se sujeta con la fuerza mínima que ella debe aportar para conseguir el sostén total del robot. Si esto no ocurre, no se podrá soltar ninguna otra pata del robot, hasta que la primera no se sujete bien. Hay dos opciones para solucionarlo: empezar de nuevo la operación de agarre con esa pata, o mover la pata y buscar un nuevo sitio donde se pueda agarrar mejor. Para medir la fuerza que se hace en el agarre se puede conseguir directamente con un sensor de presión que detecta la fuerza que se está ejerciendo; en el caso de usar ventosas de vacío, se puede medir el nivel de vacío que se produce en su interior, mientras que si las pinzas se mueven con motores se puede medir la corriente que pasa por ellos, que será proporcional al par que se está ejerciendo.

El tercer y último control es el de emergencia. Si el robot se queda sin aporte de energía, este control es el que entra a actuar para evitar que el robot se caiga. Para este último caso, la mayoría de los robots suelen tener una pequeña fuente de alimentación que funciona cuando se corta la alimentación de la energía que le llega a través de un cordón umbilical. Esta energía sirve para mantener al robot agarrado unos pocos minutos hasta que alguien vaya a recogerlo.

La arquitectura del sistema de control que utilizan la mayoría de los robots escaladores es bastante rudimentaria. Suelen usar autómatas programables o PC's básicos. Normalmente no cuentan en su estructura hardware con tarjetas específicas de control de ejes. Los movimientos de los ejes suelen ser secuenciales, eje por eje, usando una conmutación de los accionamientos. Este hecho es debido fundamentalmente a que la mayoría de estos robots no son autónomos, sino teleoperados, siendo el hardware embarcado un mero esclavo del computador en la base.

La teleoperación de la mayoría de los robots escaladores se realiza mediante interfaces hombre-máquina, centradas principalmente en los problemas de locomoción. El robot Ecuriel, desarrollado por CEA para la inspección de plantas reprocesadoras, incorpora una interfaz gráfica sobre la que se mezclan imágenes provenientes de los sensores de visión. Con ello se permite un movimiento asistido del robot. En general, los robots actuales no tienen demasiada

autonomía para decidir que camino seguir o que secuencia de accionamientos mover para dar un paso.

Este problema ha sido ampliamente tratado para robots móviles con patas (bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc.). Sin embargo, para robots escaladores, cuya estabilidad durante el movimiento es mucho más crítica, este asunto se ha empezado a estudiar solamente en los últimos años. Especial mención hay que hacer a los trabajos realizados en el Tokyo Institute of Technology donde fue desarrollado el robot escalador con cuatro patas Ninja-I. El robot, que se explicará mejor en el siguiente epígrafe, está dotado con un sistema anti-descolgamiento.

2.6 Trabajos desarrollados en los últimos años

En este apartado se pretende dar a conocer cuáles son las contribuciones más importantes de los centros de investigación en este campo. Se hará una breve descripción de los robots más significativos de cada uno de ellos. No todos los robots se mueven por vigas y columnas; de hecho, la mayoría de los que se presentan aquí se mueven por paredes.

2.6.1 Centros japoneses

El primer robot escalador que se puede encontrar en la literatura es el Mod-1 [Nishi, 86], que subía por la fachada de un edificio. Fue creado por el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Miyazaki en 1966. El robot se adhería a la pared usando ventosas de vacío. Desde entonces no han dejado de surgir nuevos prototipos por todo el mundo, lo que demuestra el gran interés que tienen todos los centros de investigación en esta materia.

Otro grupo pionero en este tipo de robots fue el formado por Sugiyama, Natoh, y Satoh, de la compañía Hitachi Ltd. [Sugiyama, 86]. Construyeron dos robots anteriores a 1986: uno con sujeción por electroimanes y otro con ventosas de vacío. Los robots se podían mover por paredes verticales o por el techo, pero no eran capaces de hacer un cambio de plano, Tampoco

eran autónomos, por lo que necesitaban una "unión umbilical" con el sistema de control y la fuente de energía situada en la base.

2.6.1.2 Universidad de Miyazaki

El departamento de Física aplicada de la Universidad de Miyazaki, bajo la tutela del profesor Akira Nishi, lleva más de 20 años trabajando en este campo. Durante todo este tiempo ha desarrollado cuatro tipos distintos de robots: El primer modelo es un robot móvil tradicional adaptado para poder moverse por una superficie vertical. El segundo tipo es un robot escalador bípedo, el tercero escala sin agarrarse a la pared; utiliza hélices para subir y bajar. El último modelo también usa hélices, pero además de escalar es capaz de volar y planear.

Robot Mod-1, Mod-2

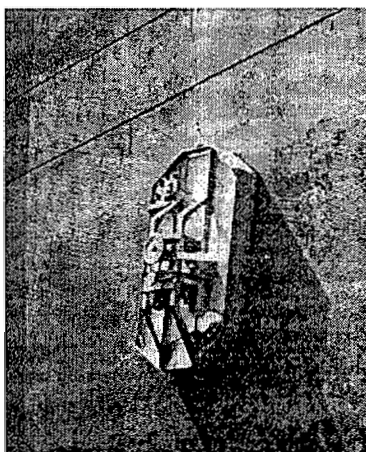


Figura 2.17 Robot Mod-I

Como se ha dicho antes, Mod-1 fue el primer robot escalador, del que se pueden encontrar datos en la literatura. Los dos robots se sostenían mediante ventosas de vacío, generado por una pequeña bomba de vacío que se encuentra en el robot. La bomba de vacío se acciona por un motor pequeño de corriente alterna en el Mod-1, y por un motor pequeño de gasolina en el Mod-2. En ambos casos, la fuente de energía para moverse está en los robots. Con los dos, estudiaron los problemas de agarre con ventosas de vacío. En posteriores experimentos comprobaron las condiciones de seguridad necesarias para que no se caiga cuando se produce un impulso de carga en el robot, es decir, si sobre el se produjese un impacto de un

objeto que se cae del edificio, o un par generado por el movimiento de la carga que transporta. Ellos propusieron un método para amortiguar esta clase de cargas.

Robot Ninjya

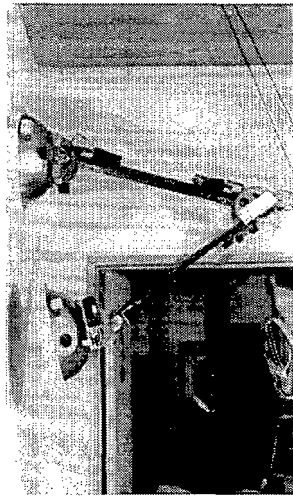


Figura 2.18 Robot Ninjya

Es un robot bípedo escalador que se adhiere a la pared mediante sendas ventosas de vacío en cada una de las patas. Tiene cinco grados de libertad; dos en cada uno de los tobillos de cada pierna, y el quinto en la entrepierna. La combinación de los dos giros del tobillo junto con el de la entrepierna permite el avance del robot [Nishi, 92]. El movimiento de la pierna libre tiene que estar muy controlado para minimizar el momento que hay en la ventosa que se queda fija, ya que si fuese muy grande, podría deslizarse o incluso peor, desprenderse.

Robots propulsados por hélices

Estos robots tienen la capacidad de subir muy rápido por la pared de un edificio gracias al sistema de hélices que tienen. Normalmente la velocidad de avance de los robots escaladores es muy pequeña. En operaciones de rescate o en caso de fuego en un edificio se hace necesario llegar con más rapidez a la zona de trabajo. Para estos casos este tipo de robots es muy útil. El primer modelo tiene una hélice, y la fuerza de empuje que genera está un poco inclinada hacia la

pared. De esta manera se origina una fuerza de fricción entre las ruedas del vehículo y la superficie de la pared que hace que se pegue a ella, y sostenga el peso del robot también.

El segundo modelo diseñado tiene dos hélices, y el robot tiene la suficiente fuerza de empuje para mantenerse en el aire y poder volar, o planear para aterrizar con mucha suavidad. Debajo de cada una de las hélices, hay un orificio del que se puede decidir cuál va a ser su apertura, y junto con un mecanismo de dos paletas se controla la dirección y sentido del movimiento. El control de estos dos dispositivos se hace a través de un ordenador "en tierra" que manda las ordenes al robot vía radio [Nishi, 99].

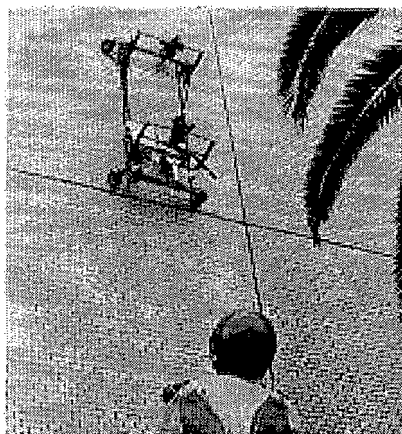


Figura 2.19 Robot propulsado con hélices

2.6.1.3 Laboratorio de ingeniería mecánico-espacial (Instituto de Tecnología de Tokyo)

Desde el año 1986 se dedican al estudio de robots escaladores. Todo sus trabajos vienen avalados por más de 20 años dedicados al campo de los robots caminantes, en los que realizaron robots tan conocidos en este sector como son el KUMO-I, o la generación TITAN. Los robots escaladores más conocidos de este grupo son: Disk Rover, Ninja y Maverick. En ellos han ensayado diferentes tipos de agarre.

Ninja-I,-II

Ninja es un robot diseñado para realizar tareas de inspección en las fachadas de edificios y puentes. Los pies del robot se acomodan a la superficie permaneciendo sujetos a ella, mientras

que la pata que se mueve se orienta en la dirección de la gravedad. Los pies también pueden moverse para colocarse con la misma orientación que la del avance del cuerpo. Cada pata se sujeta a la pared mediante una matriz de ventosas reguladas VM (Valve-regulated Multiple) - sistema de varias válvulas y ventosas de vacío para controlar la succión de cada una de ellas - consiguiendo que se reduzca la pérdida de vacío, incluso en superficies irregulares. Hirose y Nagakubo [Nagakubo, 94] propusieron para el movimiento de avance un patrón conocido como "Wall Gait", con el que se reduce el tiempo de ciclo de un robot escalador cuadrúpedo.

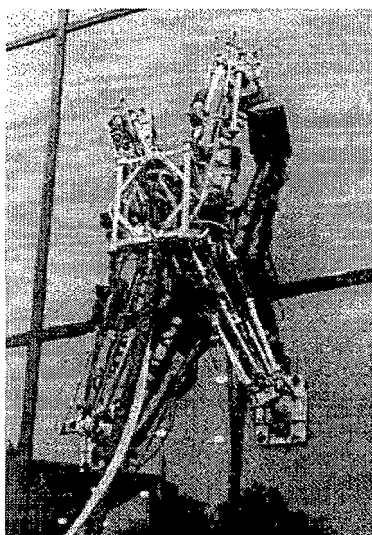


Figura 2.20 Robot Ninja-II

Disk Rover

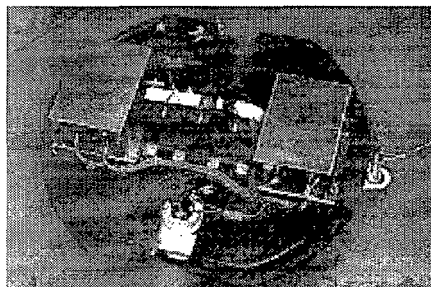


Figura 2.21 Disk Rover

Este robot usa discos de imanes permanentes para poder desplazarse alrededor de tanques de acero y barcos. Los discos giran gracias a la ayuda de unos actuadores eléctricos. El

movimiento del robot se consigue transformando el movimiento giratorio en una traslación. Los discos tienen una ligera desviación angular, lo que permite que sólo una parte de él esté en contacto con la superficie y el robot pueda desplazarse por superficies con una curvatura de un radio de hasta cinco metros [Hirose, 92].

2.6.1.4 Instituto técnico de investigación de Kajima Corporation

En este instituto, perteneciente a una de las principales empresas constructoras japonesas, Ryoji Kamei y Katsura Ogasawara han desarrollado un robot capaz de moverse a través de vigas y columnas [Kamei, 94], agarrándose mediante dos pinzas. Ellos trataron la posibilidad de trabajar con este tipo de robots en entornos tridimensionales. Querían comprobar si el robot era capaz de: colocarse en cualquier lugar de la estructura metálica y soportar su propio peso, moverse a través de vigas y columnas subiendo o bajando, y cambiarse de una viga a una columna o viceversa. El modo de avance sobre la estructura es semejante al que hace una oruga cuando se mueve por la rama de un árbol.

Todos los accionamientos del robot son motores eléctricos de corriente continua. Tiene 5 grados de libertad: dos giros en cada una de las pinzas y uno prismático que permite la extensión o contracción del cuerpo principal. El robot pesa 70 kg. Las pinzas se agarran por compresión a la estructura, y para conseguir una mayor fricción en el agarre llevan caucho en el exterior de los dedos. El espesor del caucho y sus características principales también fueron estudiados para mejorar el agarre y evitar el deslizamiento del robot cuando esté subiendo por una columna.

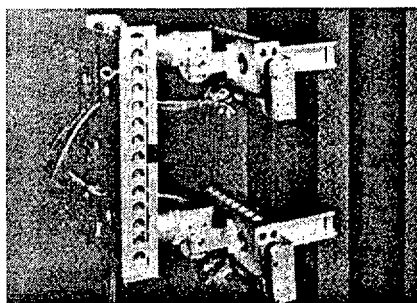


Figura 2.22 Robot Construido por la Kajima Corp.

2.6.2 Centros norteamericanos

En la mayoría de los centros americanos sí hay un interés muy alto en el estudio de robots caminantes, pero no tanto en el campo de los robots escaladores. En muchos institutos han construido algún robot escalador pero muchas veces no han seguido en esa misma línea de investigación. Aún así, se han desarrollado bastantes prototipos dignos de mención.

2.6.2.1 Instituto de Tecnología de California (JPL)

Macs-I,-II,-III

El Instituto de Tecnología de California, asociado al Jet Propulsion Laboratory, ha desarrollado un robot escalador para la inspección de la superficie externa de grandes aviones. El robot puede llevar encima una instrumentación pequeña para poder desarrollar una gran variedad de tareas mientras se mueva sobre la superficie del avión. El robot, figura 2.23, lleva una cámara que envía imágenes de la superficie del avión al ordenador base, que pueden ser transmitidas a cualquier parte del mundo a través de internet mediante una interfaz desarrollada en este mismo laboratorio (WITS). [Backes, 1997].

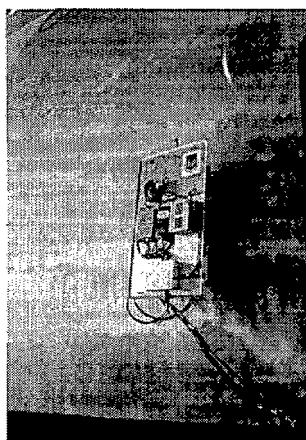


Figura 2.23 Robot MACS-I

Los tres robots poseen ventosas de vacío para adherirse a la superficie y motores ultrasónicos para desplazarse por ella. Poseen una plataforma rectangular agrupando 8 ventosas de vacío. Debajo la plataforma hay una base circular con otras ocho ventosas que permite realizar un movimiento de rotación entre ambas plataformas. Para los movimientos

traslacionales, los dos motores ultrasónicos se mueven a la vez para desplazar una plataforma respecto de la otra. Los motores ultrasónicos pesan muy poco y proporcionan un par muy alto; por esta razón también se han usado bastante en robots teleoperados espaciales. MACS-I posee dos motores que usa a la vez para movimientos lineales, y uno solo para girar. En las versiones MACS-II, -III se reduce el número de motores con la intención de reducir el peso del robot, cuestión muy importante en el diseño de robots escaladores. Con un solo motor se consigue el desplazamiento y el cambio de dirección. El control del robot se realiza desde un ordenador personal que lleva el robot a bordo.

2.6.2.2 Departamento de Ingeniería Mecánica del MIT

Libra

El objetivo del proyecto LIBRA (Limbed Intelligent Basic Robotic Ascender) es realizar un estudio cuantitativo y cualitativo de planificación de trayectorias de escalado y de estrategias de control [Argaéz, 91].

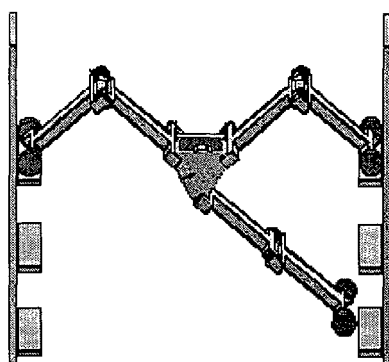


Figura 2.24 Robot Libra

El robot tiene seis grados de libertad, número mínimo requerido para que pueda conseguir la posición y orientación adecuada que le permita ejercer una fuerza específica contra la pared, que es la que hace que se sostenga y suba. Por esta razón, tiene tres brazos de seis grados de libertad cada uno. Con más patas alcanzaría mayor estabilidad cinemática, pero tres es el mínimo. Los accionamientos son motores de corriente continua.

El robot se desplaza mediante sujeción entre paredes próximas, de forma similar a lo que hacen los alpinistas que suben por "chimeneas". En este caso, el control de la sujeción se realiza mediante el control de la fuerza ejercida por el robot sobre las paredes. El control fuerza/par para un agarre estable de este tipo de robots es de gran importancia, ya que de ello depende su seguridad.

2.6.2.3 Instituto de robótica. CMU

SM²

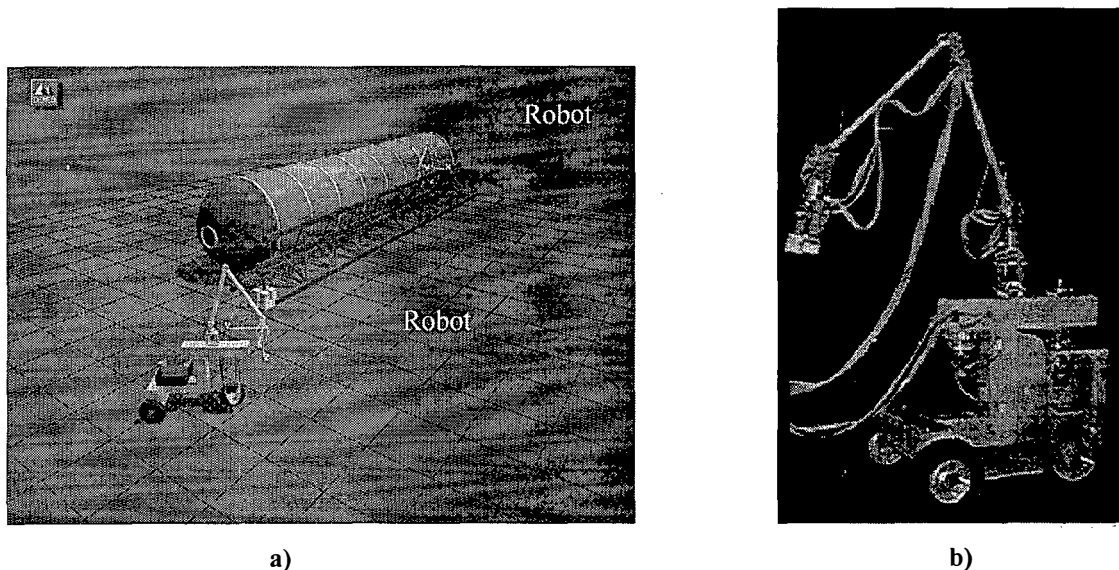


Figura 2.25 Robot trabajando en una estructura tridimensional. a) Simulación, y b) foto real

SM² no se puede considerar un robot escalador, puesto que se ha hecho para moverse por la estructura en vigas de doble T que conformaran las futuras estaciones espaciales, como se muestra en la figura 2.25 a). En la figura 2.25 b) se puede ver al robot encima de un robot móvil. Al moverse en el espacio tiene una gran ventaja respecto a los escaladores, no tiene que vencer a la fuerza de la gravedad para moverse por la estructura. Su forma de agarre a la estructura es por medio de pinzas, al igual que el robot de la empresa Kajima, Ltd., el de la universidad de Nagoya, y el robot ROMA.

La pinza tiene tres dedos, y puede agarrarse a vigas de distinta anchura. Uno de los dedos se mueve por medio de un motor de corriente continua, abriendo o cerrando así la pinza.

Un potenciómetro lineal mide la apertura de la pinza, mientras que con la corriente que pasa por el motor se calcula el par de agarre que hay en la pinza. Mediante sensores de contacto y sensores capacitivos en la base de los dedos se comprueba si la pinza ha hecho un buen agarre o no. Todos los sensores de la pinza realizan otra función muy importante, ayudan a alinear la pinza con la viga para que el agarre se produzca adecuadamente [Nechyba, 95].

2.6.3 Centros europeos

Quizás sea en Europa, junto con Japón donde se encuentren un mayor número de equipos de investigación implicados en el estudio de robots escaladores. En cada país europeo hay algún centro dedicado al diseño y desarrollo de este tipo de robots. Tal es el interés que hay suscitado que se ha creado una red temática (CLAWAR) para poder poner en contacto a todos los institutos, universidades y empresas que trabajan en este campo de investigación. Hasta ahora se han celebrado dos congresos internacionales sobre este asunto.

Existen numerosos robots con ventosas que son capaces de moverse por paredes planas, entre los cuales podemos destacar los desarrollados en el Portech, en la Universidad de West of England y en la Universidad de Hannover. Una solución similar fue adoptada por la South Bank University para la inspección mediante ultrasonidos del estado de grandes tanques de acero con la ayuda un robot escalador. De todos los desarrollos existentes se van a nombrar los que se han considerado más interesantes y los institutos o departamentos que han diseñado más de un robot.

2.6.3.1 Universidad de Portsmouth (Reino Unido)

El grupo de robótica móvil de la Universidad de Portsmouth junto con la empresa Portech Ltd. (Portsmouth Technology Consultant Ltd.) ha diseñado durante los últimos diez años una gran variedad de robots caminantes y escaladores que han servido de pauta al desarrollo de diferentes robots en muchos laboratorios europeos. La mayoría de sus trabajos están enfocados en robots para aplicaciones en entornos muy peligrosos y no estructurados, tal y

como ocurre en el sector nuclear. A continuación se van a presentar sus desarrollos más importantes:

Nero-I, -II, -III

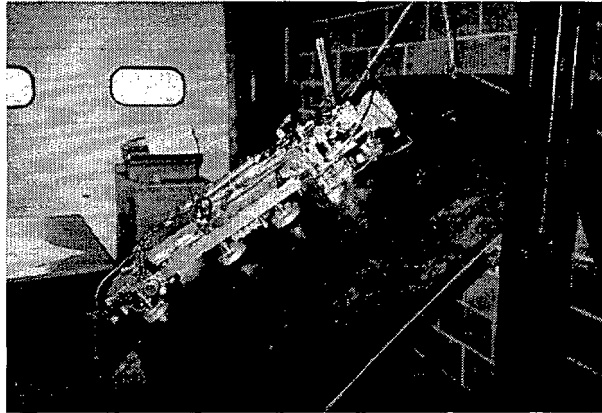


Figura 2.26 Robot Nero

La serie Nero (Nuclear Electric Robot Operator) fue diseñada con el objeto de crear vehículos escaladores capaces de subir por la vasija de un reactor de una central nuclear, que es una zona en la que hay una atmósfera muy contaminada. Estos robots poseen dos plataformas donde cada una de ellas hay cuatro ventosas de vacío móviles. Dos actuadores neumáticos permiten realizar un movimiento de traslación entre ambas plataformas. Para los movimientos rotacionales, la plataforma interior posee una articulación que permite este tipo de movimientos.

Tribot (Scour)

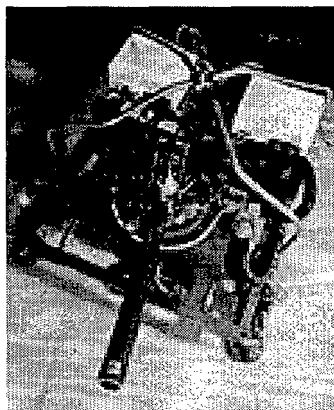


Figura 2.27 Robot Tribot

Fue diseñado para una compañía americana que necesitaba un vehículo capaz de subir superficies cóncavas o convexas, con un radio de curvatura de 2.5 metros de estructuras altas, pudiendo salvar además obstáculos de 76 mm de altura. Está caracterizado por una alta relación potencia-peso y una alta capacidad de carga. Emplea un sistema de teleoperación bastante sencillo. La figura 2.27 muestra una foto de este robot.

Robug II

Para decidir la cinemática del Robug II, que aparece en la figura 2.11, analizaron los sistemas de locomoción, de sujeción, y la anatomía de los seres vivos que se mueven por superficies verticales. Se centraron en los insectos y arañas, que tienen que vencer la gravedad para moverse en zonas complejas. Todos los accionamientos de las articulaciones son neumáticos, por lo que los robots se sujetan mediante ventosas de vacío. La máxima preocupación durante el desarrollo de toda la serie de robots fue conseguir un buen nivel de seguridad en el agarre del robot a la pared, normalmente controlando el nivel de vacío que se produce en las ventosas [Luk, 95].

El robot está dotado de cuatro patas neumáticas, con tres grados de libertad cada una. Tiene una articulación adicional, dividiendo al cuerpo en dos partes, lo que le facilita el paso del suelo a la pared. Cada pata está dotada con sensores de presión y posición, y es gobernada por un microcontrolador a bordo. Para moverse fija las ventosas que tiene en el vientre y mueve las cuatro patas simultáneamente hasta una nueva posición estable o segura, después de la cual se realiza la transferencia del cuerpo siguiendo el camino que se le ha indicado.

Robug III

Sus especificaciones fueron hechas por el grupo TELEMAN, formado por Nuclear Electric, EdF, CERN, y ENEL. La figura 2.28 presenta el robot Robug III. Entre sus características destacan: la capacidad de moverse de un plano a otro (del suelo a la pared, de la pared al techo), puede arrastrar una carga de 100 Kg. cuando se desplaza horizontalmente, llevar una carga de 25 Kg. mientras sube, y pasar por conductos muy estrechos.

Han diseñado un control jerárquico que está dividido en 7 capas o niveles que va desde el tratamiento de datos referentes a los sensores y actuadores (*Physical layer*) hasta la que se encarga de organizar las distintas tareas que tiene que llevar el robot a cabo en una misión concreta (*Project layer*) [Luk, 95]. Cabe destacar que una vez que se decide que tipo de movimiento se va realizar, cada pata tiene un microcontrolador que es el que se encarga de que dicha pata realice el movimiento que se le ha solicitado, asegurando que se agarra con un mínimo nivel de seguridad.

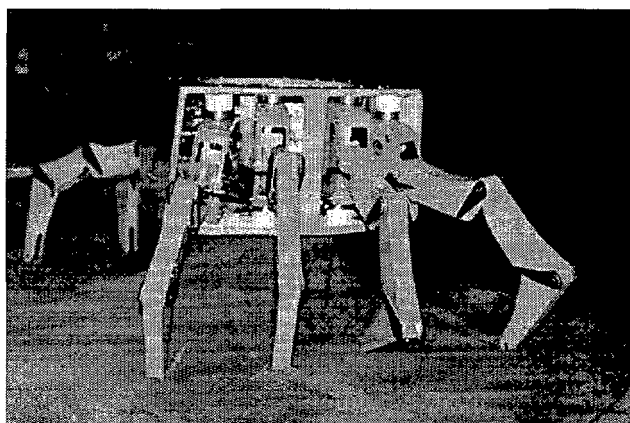


Figura 2.28 Robug III

Todos los movimientos que realizan las patas del robot no pueden ser teleoperadas, en gran parte, debido al alto grado de redundancia que hay en todas sus patas. Por tanto, basándose en la experiencia de proyectos anteriores, han empleado un conjunto de reglas que definen el comportamiento del robot para reaccionar a la información que le viene del exterior. Las reglas están principalmente diseñadas para facilitar la teleoperación del robot, y reducir el riesgo de daño del robot y del entorno en el que se mueve.

Actualmente este grupo, junto con la empresa Portech Ltd., está desarrollando un nuevo prototipo de la serie robug, ROBUG IV, donde impera una modularidad [Cooke, 98]. ROBUG IV tiene 8 patas con 4 grados de libertad cada una de ellas. La diferencia principal con sus antecesores está en la distribución de la electrónica de control entre las diferentes patas. La comunicación de estos controladores con el central que se encuentra en el cuerpo se hace a

través de un *bus* CAN con lo que se consigue una reducción muy alta de todo el cableado que puede tener el robot, con la facilidad de cambiar de un sistema de control a otro (portabilidad). El robot puede seguir funcionando aunque le falte alguna de sus patas. De esta forma, se cumple con uno de los objetivos que se han planteado en la red temática CLAWAR, que es la modularidad en un robot escalador. La figura 2.29 muestra al prototipo ROBUG IV.

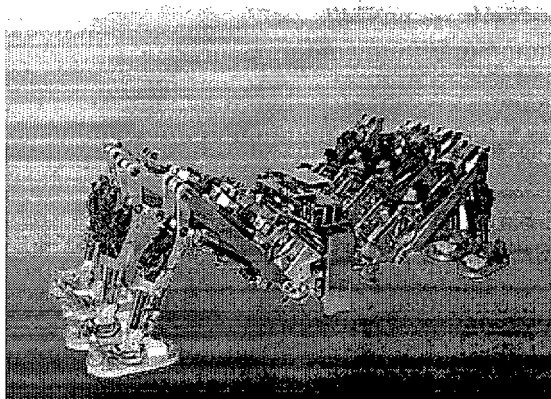


Figura 2.29 ROBUG IV

2.6.3.2 Instituto para los problemas en Mecánica (Rusia)

El instituto para los problemas en Mecánica, perteneciente a la Academia Rusa de Ciencias, ha realizado varios estudios sobre robots escaladores [Gradetsky, 98] y han experimentado con diversas ventosas de vacío [Gradetsky, 92]. Son muy interesantes sus trabajos sobre la capacidad de crear vacío en distintas superficies con distintas ventosas. Todo este trabajo se ha hecho bajo la supervisión del Dr. V. Gradetsky.

Robot para la limpieza de fachadas

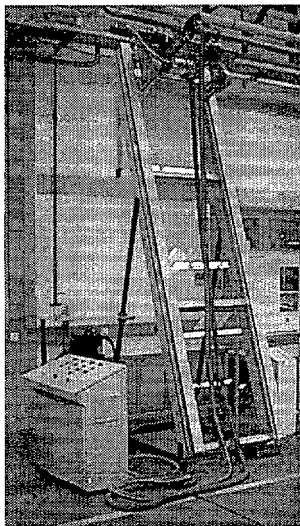
Es un robot de servicio cuyo cometido es limpiar la fachada de un edificio usando una "fregona". El robot está formado por un cuerpo central, una turbina, dos pares de ruedas, "un sellante" y una plataforma de transporte [Gradetsky, 97]. El vacío se genera por medio de la turbina que va en el robot.

El robot recibe información de las fuerzas y pares que actúan sobre él, y lo usa para realizar un control adaptativo de su movimiento sobre la superficie de escalada. El sistema de control corrige el grado de vacío que se produce en cada instante de acuerdo con la velocidad y

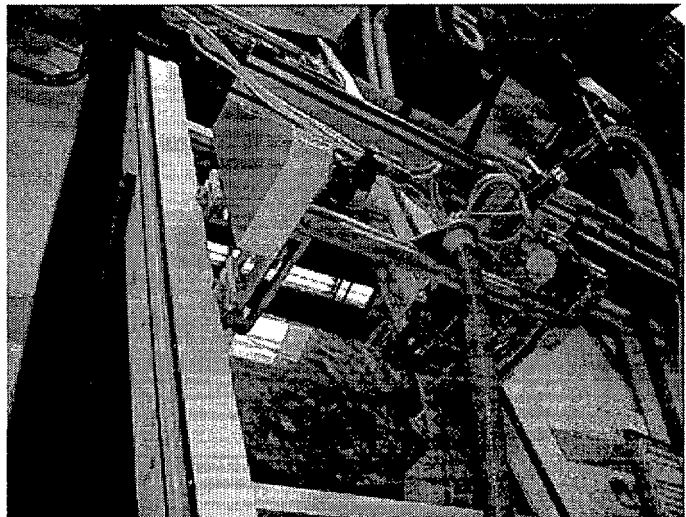
las diferentes velocidades de las ruedas. El proceso de adaptación de la "ventosa de vacío" se hace mediante una realimentación del grado de vacío, usando sensores de vacío.

El sistema de control del movimiento es adaptativo, en el sentido en que, tiene la posibilidad de corregir los movimientos programados de las ruedas. La información de realimentación de las fuerzas de acción sobre las ruedas es necesaria para proporcionar una fuerza de fricción máxima que consiga un movimiento sin deslizamiento de las ruedas. De esta manera, el sistema da la suficiente fuerza de fricción para las ruedas y el deslizamiento de la "ventosa de vacío" al mismo tiempo.

2.6.3.3 Instituto Fraunhofer de fabricación y automatización (IPA), (Alemania)



a)



b)

Figura 2.30 a) Sistema de limpieza de fachadas, y b) Vista detallada del robot SFR II

Robot SFR II

El centro IPA ha desarrollado un robot para la limpieza de ventanas de edificios que tienen jambas y barras horizontales en su fachada (SFR II) [Schraft, 99]. Desarrollaron un primer prototipo (SFR I) que les permitió conseguir un conocimiento sobre diferentes métodos de limpieza de una ventana. El sistema completo está formado por el robot con la herramienta limpiadora que está compuesta por tres cepillos especiales que han sido desarrollados por la empresa Dornier-Technology, la unidad de alimentación, y la unidad de

control. La figura 2.30 a) muestra el sistema completo, y la 2.30 b) una vista más detallada del robot.

El robot está conectado con la unidad central a través de mangueras y cables. A la cabeza limpiadora se le proporciona agua y aspira la usada para reciclarla. La unidad de control se encarga de la regulación y control del sistema completo. Está conectado a los motores eléctricos y a los sensores que tiene el robot.

2.6.3.4 Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Sistemas de la Universidad de Catania (Italia)

La Universidad de Catania, miembro de la red temática CLAWAR, ha desarrollado diferentes proyectos en los que están involucrados el desarrollo de diferentes robots escaladores. Sus principales trabajos están dedicados al diseño y desarrollo de robots caminantes de servicio para la inspección de plantas industriales, de entre los que destaca el robot ROBINSPEC, antecesor del robot SURFY. Actualmente, forman parte de un proyecto dedicado al desarrollo de un robot de inspección en centrales petroquímicas.

Robot SURFY

El principal objetivo para el que se ha desarrollado el robot SURFY es inspeccionar el grado de corrosión de los depósitos de una industria petroquímica. En sus primeros ensayos el robot va equipado con un equipo de ultrasonidos que comprueba el grosor de la pared metálica del depósito y su grado de corrosión. Todos los ensayos que realizan sobre los depósitos son no destructivos, con lo que no se causa ningún daño sobre la superficie que se está examinando.

El robot está formado por dos cuerpos: uno externo que soporta a la plataforma que lleva a la carga, y otra interno que está conectado al primero mediante unas guías y se mueve longitudinalmente respecto del otro. Cada cuerpo tiene 4 ventosas de vacío que tienen además, sensores de vacío. El desplazamiento de una plataforma respecto de la otra se consigue con dos cilindros accionados con aire comprimido, y el giro con un motor eléctrico.

Hay una estación remota desde donde el usuario maneja el robot, que se comunica mediante una línea RS-422 con el microcontrolador que está a bordo del robot y es el encargado de controlar todos sus movimientos, [La Rosa, 99]. La figura 2.31 muestra una foto del robot SURFY durante sus primeros ensayos de agarre.

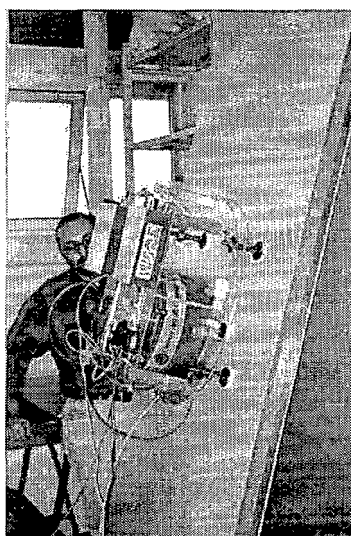


Figura 2.31 Robot Surfy

2.6.3.5 Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas (CEIT), (España)

Robicen-I,-II,-III

El Departamento de Mecánica Aplicada del CEIT, en colaboración con la Universidad de Chile desarrollaron Robicen-I,-II, y -III, desarrollaron un robot para realizar inspecciones en centrales nucleares. El robot tiene dos cuerpos iguales entre los que hay dos uniones extensibles, compuestas de dos cilindros neumáticos y un mecanismo que ayuda a producir la extensión del robot. Cada cuerpo tiene dos cilindros neumáticos largos, una guía central para mantener la rigidez y cuatro ventosas de vacío. El movimiento del robot se compone de traslaciones y rotaciones elementales. Robicen -I, y -II pueden pasar del suelo a la pared o viceversa. El sistema de control está en un ordenador personal desde el cual se mandan los movimientos del robot y en un microcontrolador que hay a bordo se maneja la información de la cabeza sensorial y el sistema neumático, [Serna, 97]. En la figura 2.32 se pueden ver Robicen-I, -II, y -III de derecha a izquierda respectivamente.

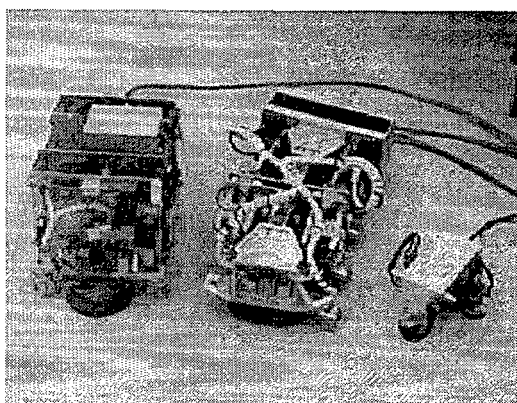


Figura 2.32 Robots Robicen -I, -II, -III

2.6.3.6 Instituto de Automática Industrial (España).

El Departamento de Control Automático, a cargo del Dr. Manuel Armada, ha desarrollado durante los últimos años diferentes robots caminantes y escaladores. Inicialmente desarrollaron un robot autopropulsado llamado Brincadeira [Armada, 90] que tenía sólo tres grados de libertad. Cada extremo del robot tenía un electroimán, que le permitía adherirse a las superficies ferromagnéticas. Para conseguir el movimiento en las articulaciones usa motores de corriente continua. Este prototipo fue ampliamente usado para investigar estrategias de control tales como realimentación de esfuerzos y control adaptativo.

Rest

Es un robot escalador hexápodo con tres grados de libertad en cada una de las patas, que son movidas por motores de corriente continua. Para poder agarrarse a las superficies ferromagnéticas, tiene un mecanismo de agarre basado en imanes permanentes y electroimanes en cada una de sus patas. La patas tienen un mecanismo tipo "scara" con las dos primeras articulaciones rotacionales y la última prismática [Grieco, 97].

El sistema de control reside en un ordenador personal en el robot que trabaja como maestro para cada uno de los microcontroladores (divididos en varias tarjetas de control de ejes) que manejan en tiempo real los 18 grados de libertad que tiene el robot. En el robot han experimentado diferentes tipos de "paso", en especial los relacionados con el método de caminar discontinuo, y distintos tipos de control en el agarre.

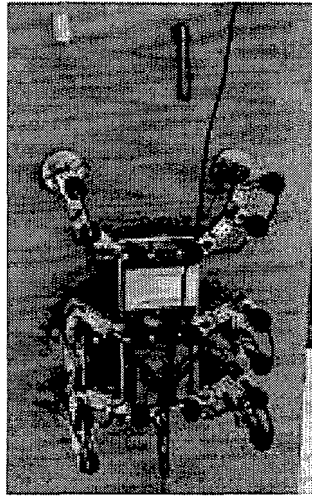


Figura 2.33 Robot REST

2.6.3.7 Universidad de Elche (España)

Robot TREPA

En esta universidad han propuesto un robot paralelo basado en un plataforma Stewart capaz de escalar por palmeras con el objeto de fumigar y podar la parte más alta de éstas. Los productos químicos que se usan en la fumigación son muy tóxicos

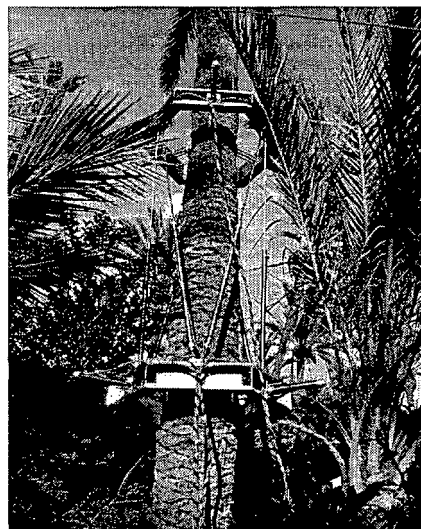


Figura 2.34 Robot TREPA

El robot está basado en una plataforma de Stewart, con 6 grados de libertad [Saltarén, 99], y un brazo manipulador en el extremo que usa para realizar diferentes operaciones sobre la palmera. Tiene dos anillos que se abren y cierran, con lo que a la hora de trabajar en una palmera rodean su tronco y le permiten agarrarse a él. Todos los accionamientos que posee son neumáticos. El brazo manipulador lleva una cámara y todas las herramientas necesarias para su trabajo.

El sistema de control está basado en un PC, un microprocesador para el control de la comunicación y de las electroválvulas, y dos cámaras (la que va en el robot y la que observa toda la escena). Todas las señales de control se transmiten a través de fibra óptica. El robot está todavía en proceso de desarrollo. [Aracil, 99]

Como resumen, se puede afirmar la mayoría de los robots "escaladores" descritos tienen varios aspectos en común:

- La mayoría de ellos no son autónomos, tienen un "cordón umbilical" que los conecta al computador base, que es quién les da las ordenes de movimiento. Este mismo "cordón umbilical" les suministra la energía (neumática o eléctrica) necesaria para los movimientos.
- El control de los robots no suele ser demasiado sofisticado, centrándose únicamente en los problemas de locomoción y seguridad. El movimiento es teleoperado sin posibilidad de una navegación autónoma
- Son robots que pesan mucho y por tanto no pueden llevar demasiada carga útil. Esto limita el número de sensores que los robots pueden llevar, tanto para la navegación como para la operación a realizar.
- Los robots, en general, son muy altos, con lo que la distancia del centro de gravedad a la superficie de sujeción es grande. Por esta razón, la fuerza de agarre necesaria para que el robot se sujete con seguridad a la superficie vertical es grande, lo que a su vez aumenta el peso del robot.

- Los robots se limitan a moverse sobre superficies lisas tales como: paredes, techos, cascos de barcos, fuselajes de aviones, etc. No permiten movimientos por estructuras más complejas como vigas, pilares, etc.

El control de locomoción de este tipo de robots se hace de forma secuencial moviendo el robot paso a paso, es decir, eligiendo la secuencia de movimientos de todas sus articulaciones para que el robot avance o gire, y sea capaz de pasar de una superficie a otra. El problema es similar al de los robots bípedos, teniendo algunos hasta seis u ocho patas, pero con una diferencia importante, la seguridad para evitar que se caigan si, por ejemplo, hay un fallo energético en la alimentación de aire comprimido. Esta preocupación por la seguridad es común a todos los robots con accionamientos neumáticos que usan ventosas de vacío como forma de sujeción.

A continuación se presenta una tabla con las características principales de los robots antes mencionados. También aparecen otros robots que no han sido mencionados en este epígrafe, ya que poseían peculiaridades muy parecidas a alguno de los robots que sí han sido citados.

Nombre	Centro	Sujeción	Dimensiones (m)	Relación peso/carga(kg)	Aplicación	Actuadores
Nero	Univ. Portsmouth	8 Ventosas de Vacío	0.8x0.3x0.16	15.6/23	Pintura	Neumáticos
Tribot	Univ. Portsmouth	12 Ventosas de Vacío	1.1x1.1x0.2	82/	Inspección y Limpieza	Neumáticos
Maverick	Inst. Tecn. Tokio	6 IB Magnéticas	0.7x0.7x0.3	60/		Neumáticos/ Eléctricos
Self-Propelled	Hitachi	16 Ventosas de Vacío	1.8x1.8x0.65	140/		Neumáticos
Wall vehicle	Hitachi	8 Pies Magnéticos	0.45x0.45x0.13	20/12	Inspección	Eléctricos
Brincadeira	I.A.I.	2 Pies Magnéticos	0.6x0.6x0.3	6/	Investigación	Eléctricos
REST	I.A.I.	Imanes	1.1x0.6	220/100		Eléctricos
CWRU	Univ. Hannover	Ventosa de vacío			Inspección	Neumáticos
Ninja-I	Inst. Tecn. Tokio	4 Ventosas de Vacío	1.8x0.4x0.4	45	Limpieza	Neumáticos
Robicen	CEIT	3 Ventosas de Vacío	0.6x0.32x0.3	30/10	Nuclear	Neumáticos
Robug III	Univ. Portsmouth	8 Ventosas de Vacío	0.8x0.6x0.6	60/100	Nuclear	Neumáticos
Robug IV	Univ. Portsmouth	8 Ventosas de Vacío	0.3x1.1x0.4	/5		Neumáticos
SM ²	CMU	Pinzas	3.28	5.27/	Espacial	Eléctricos
MACS	JPL	Ventosas de Vacío			Inspección y Limpieza	Neumáticos/ Eléctricos
LIBRA	MIT	Empuje	1.2x0.6x1.38	6.8/	Investigación	Eléctricos
Robug II	Univ. Portsmouth	7 Ventosas de Vacío	1.0x0.7x1.6	15/30	Investigación	Neumáticos
Disk-Rover	Inst. Tecn. Tokio	2 Discos Magnéticos	0.6x0.6x0.4	25/10		Eléctricos
Propeller	Univ. Miyazaki	Hélices	1.6x0.8x0.8	16/2	Desastres	Eléctricos
Ninja	Univ. Miyazaki	4 Ventosas de Vacío	0.7x0.7x0.3	12/1	Investigación	Neumáticos
Robot Kajima	Kajima Corp.	Pinzas de Agarre		70/	Inspección	Eléctricos
TREPA	Univ. Elche	Anillos de Agarre			Fumigación Poda	Neumáticos
SFR II	IPA		0.95x1.43x0.45	45/5	Limpieza	Neumáticos/ Eléctricos
SURFY	Univ. Catania	8 Ventosas de Vacío	0.3x0.6x0.4	15/5	Petroquímica	Neumáticos/ Eléctricos

Tabla 1.1 Características principales de los robots presentados en este capítulo

Estudio del reino animal

3

3.1 Introducción

La naturaleza ha sido siempre una fuente de inspiración para todos los investigadores que se han dedicado al diseño y desarrollo de máquinas de toda clase. Los constructores de vehículos y de robots móviles tampoco han despreciado el amplio conocimiento que se puede extraer del reino animal. De hecho, la mayoría de sus creaciones están, total o parcialmente, basadas en diferentes seres vivos, en concreto en los que tienen la capacidad de desplazarse de un sitio a otro.

Son muchos los aspectos que se pueden tener en cuenta a la hora de estudiar a cualquier animal:

Cuál es su estructura, si tiene patas o no, cómo distribuye el peso de su cuerpo a la hora de moverse, cuál es su morfología, de que materiales está compuesta la estructura que soporta todo su cuerpo. Cuál es su mecanismo de locomoción, como coordina todos los elementos que le permiten su desplazamiento.

Si el estudio se hace sobre animales que pueden subir por superficies inclinadas o verticales, también se podrá estudiar cuál es su mecanismo de agarre, para quedarse sujeto a la superficie por la que asciende y conseguir vencer a la fuerza de la gravedad, y cuál es la estructura que tiene para facilitar esa sujeción y el movimiento por superficies verticales.

Sin embargo, no se debe perder de vista una máxima: el movimiento de cualquier animal, ya sea caminando, corriendo, o escalando siempre será mucho más elegante y más avanzado que el que se pueda lograr con cualquier vehículo caminante o escalador, de los contruidos hasta ahora. Esto seguirá siendo así siempre, pues es muy difícil conseguir en una máquina, el gran nivel de evolución al que se ha llegado en el reino animal. Lo que sí se puede hacer, al menos, es analizar porqué los animales son tan eficientes en sus movimientos, y ver qué se puede aprender de ellos. Una vez alcanzada esta fase, será posible determinar que aspectos de la locomoción de los animales pueden ser imitados o mejorados en una máquina, y cuáles dependen de propiedades puramente biológicas y no podrán ser nunca emuladas en un vehículo.

La mayoría de los estudios realizados hasta ahora, están enfocados en dos grandes campos: por un lado, los encaminados a reflejar la locomoción de diferentes animales; de los que se han estudiado dos grandes familias: los mamíferos, y los insectos. En segundo lugar, hay una multitud de trabajos que modelan el vuelo de diferentes seres vivos. En este caso, también son dos las grandes familias sobre las que se ha incidido en gran profundidad: aves e insectos. Sin embargo, no hay muchas publicaciones sobre las adaptaciones del reino animal para escalar, ya sea por árboles o por superficies verticales. Se puede considerar que es muy parecido a la locomoción de los animales, pero sí hay ciertas diferencias en sus estructuras, por lo que todos

los animales que caminan no tienen la capacidad de escalar, y en la forma de agarrarse difieren en gran parte unas especies de otras, tal y como se verá más adelante.

3.2 Adaptaciones estructurales

Todos los animales que se desplazan han adaptado, de una forma u otra, su forma de locomoción al entorno en el que viven. Esta adaptación suele ser mayor o menor en función del grado de evolución de la especie. Por ejemplo, los mamíferos terrestres tienen las patas debajo del cuerpo para conseguir una mayor eficiencia energética. Otra clase de adaptación muy estudiada en la literatura es la coordinación entre las diferentes patas de un animal a la hora de andar, trotar, o galopar. Así, las especies con un gran número de patas, se encuentran con la necesidad de conseguir una buena coordinación entre los movimientos de cada una de ellas. Algunas de estas relaciones que se pueden observar en la naturaleza no se podrán aplicar a las estructuras mecánicas, pero otras, sí serán de gran utilidad.

De entre todo el reino animal se pueden distinguir tres familias muy amplias que son las más interesantes para estudiar sus mecanismos de locomoción: los insectos, los mamíferos y los reptiles. En cada uno de los grupos hay multitud de especies que pueden caminar, trotar, galopar, o escalar. Todas las especies tienen diferentes estructuras óseas, o la disposición de sus apéndices es muy distinta, aunque sí hay ciertos puntos que son comunes a la mayoría de los miembros de cada familia.

3.2.1 Reptiles

Los reptiles mejor adaptados para escalar pertenecen a dos familias distintas: los que no tienen extremidades, los ofidios (un ejemplo de ellos son las serpientes), y los que sí tienen, los saurios y los crocodilios (lagartos y cocodrilos).

Las serpientes se mueven gracias al movimiento ondulatorio que realizan con todo su cuerpo. Su peso se distribuye a lo largo del animal ya que tiene forma cilíndrica. El movimiento acordeón permite a una serpiente moverse dentro de un estrecho conducto, por ejemplo, al trepar por un árbol utilizando los canales irregulares en la madera. La serpiente se extiende hacia adelante al tiempo que dispone su cuerpo en ondas con formas de S contra los lados del canal. Para avanzar en línea recta, como por ejemplo, cuando atacan a sus presas realizan movimientos rectilíneos, una forma de locomoción que utiliza sus grandes escamas abdominales. Dos o tres zonas de escamas están en contacto con el terreno, mientras que el resto del cuerpo se desplaza hacia adelante. Este efectivo movimiento permite a las víboras del desierto moverse con sorprendente rapidez sobre superficies móviles arenosas, con un mínimo de contacto con el suelo. El crótalo avanza así formando bucles que se desplazan hacia adelante, al tiempo que su cuerpo yace con un ángulo de 60° , en relación con la dirección principal de desplazamiento.

Los saurios y los crocodilios tienen las patas colocadas en la parte lateral del cuerpo, tal y como se muestra en la figura 3.1. Esto les permite tener una mayor estabilidad cuando están quietos y facilitan que el centro de gravedad esté muy bajo. Esta morfología ayuda a deslizarse sobre bancos de lodo y debajo de troncos de árboles.

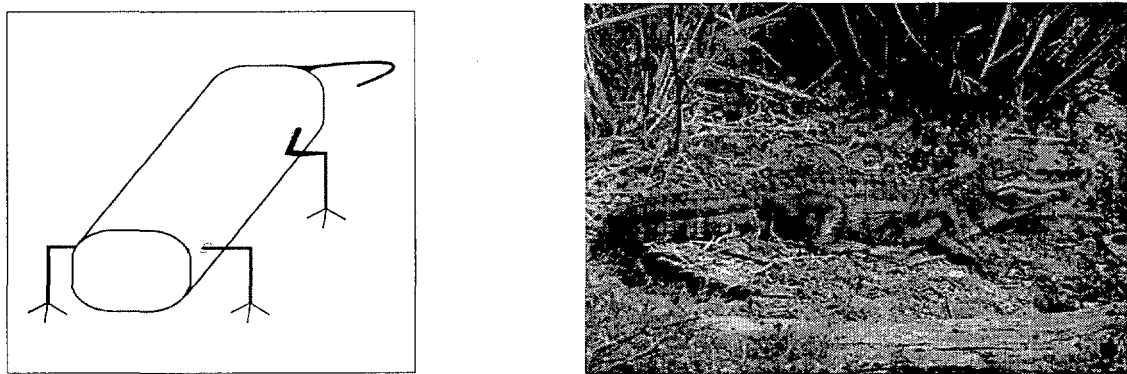


Figura 3.1 Estructura de un cocodrilo

Con esta estructura pueden subir por superficies verticales con mucha facilidad y rapidez, agarrándose a los troncos de los árboles, o sujetándose a la superficie de las piedras

rugosas sobre las que escalan con gran facilidad. Esta morfología no genera momentos, ni esfuerzos muy grandes en el tronco, ya que el centro de gravedad se encuentra muy cerca del plano de escalada.

Sin embargo, esta morfología también tiene sus desventajas:

- 1.- Cuando se mantienen sobre las patas opuestas, colocadas en una diagonal, hay un gran momento de giro sobre el eje longitudinal del cuerpo, que tienen que resistir las articulaciones de la pelvis y el tórax. Dichas articulaciones tienen que ser muy rígidas para poder soportar tal esfuerzo.
- 2.- Aunque el reptil esté quieto, la cadera continúa gastando energía para sostener el peso del cuerpo. Hay que tener en cuenta que esta situación nunca aparece en las máquinas, ya que sus articulaciones pueden sostener una carga estática sin consumir energía.

3.2.2 Mamíferos

Los mamíferos tienen las patas delanteras y traseras colocadas siempre en la dirección de avance del movimiento. La altura del centro de gravedad depende de la longitud de las piernas, aspecto éste importante ya que se necesita menos esfuerzo para agarrarse a una superficie vertical cuanto más cerca esté el centro de gravedad de ella. La longitud de las piernas también influye bastante en la velocidad de locomoción del animal.

La orientación vertical de las patas de los mamíferos se puede considerar una adaptación para contrarrestar mejor la fuerza de gravedad, facilitando el transporte del peso del animal. La disposición vertical de las extremidades será mucho mayor, cuanto mayor sea el peso del animal. Así el elefante deberá mantener siempre sus patas lo más verticales que pueda. La necesidad de mantener las piernas casi verticales la mayoría del tiempo impone restricciones en el paso, ya que produce la necesidad de mantener las cargas de choque en un valor mínimo ya que los huesos de tales animales están sometidos a tensiones muy altas. Los animales pesados poseen adaptaciones adicionales para poder acarrear su peso.

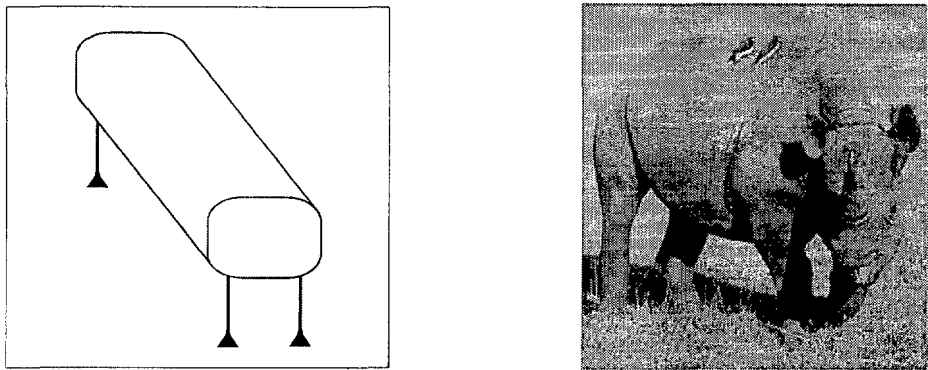


Figura 3.2 Estructura de un mamífero

Sin embargo, los mamíferos no tienen los problemas que se presentan en los reptiles, pero si necesitan tener más cuidado en el control de su estabilidad. Manteniendo las piernas casi verticales, se minimiza la tensión de curvatura o pandeo, sobre la parte alta del hueso de la pierna y también reducen el gasto energético necesario para el soporte del cuerpo, tal y como aparece en la figura 3.2.

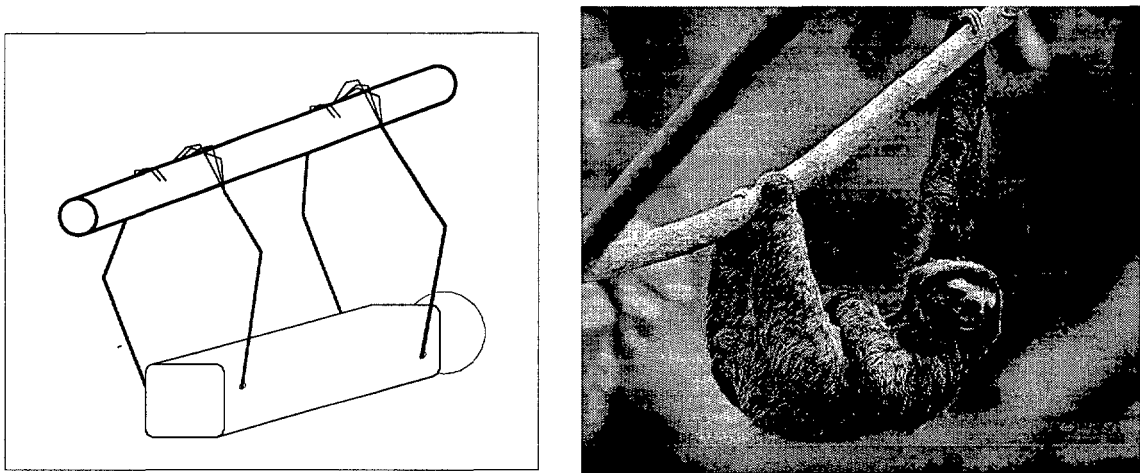


Figura 3.3 Perezoso colgado de una rama

La mayoría de los mamíferos no escala con mucha facilidad. Los mejor adaptados son, dentro de los de menor tamaño los roedores, y en especial las ardillas. De entre los de mayor tamaño se encuentran los primates, los perezosos y los koalas. Los pequeños siguen manteniendo la misma morfología en sus patas que la mencionada en los párrafos anteriores. En cambio, los de mayor tamaño tienen las cuatro extremidades curvadas, para adaptarse

mejor al movimiento sobre los troncos y ramas de los árboles, tal y como se ve en la figura 3.3. Este es el caso típico de los monos y los perezosos.

3.2.3 Insectos

Los insectos han sido desde siempre, una buena fuente de inspiración para los diseñadores de robots escaladores y caminantes. Muchos de los robots presentados en el capítulo 2 se han diseñado fijándose en alguna de estas especies. Los insectos suelen tener un número de patas mayor a cuatro, que se reparten por igual a los dos lados del cuerpo. Los que tienen seis patas son los más comunes, como es el caso de las arañas, los saltamontes, cucarachas, insectos palo o las hormigas, que son los más estudiados por los diseñadores de robots caminantes. También los hay con un número mayor de patas como ocurre en las orugas, los ciempiés o los milpiés.

Los insectos tienen una gran ventaja para escalar: su poco peso. El tamaño de las patas en proporción con el cuerpo suele ser mucho más grande. Las articulaciones intermedias de cada una de las patas suelen estar por encima del cuerpo. Esto permite que el centro de gravedad esté muy bajo, cerca de la superficie sobre la que se mueve el insecto. Así, el cuerpo se mantiene fácilmente agarrado, figura 3.4.

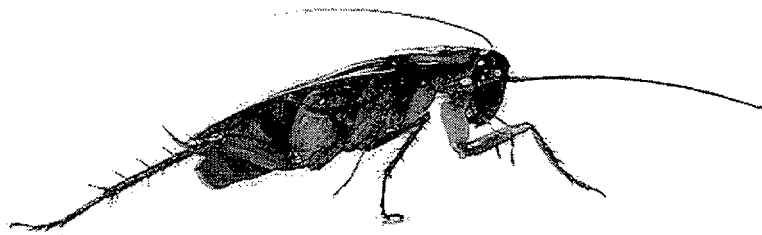
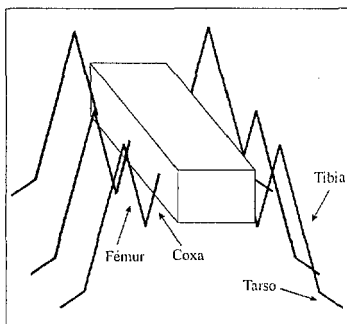


Figura 3.4 Estructura de un insecto

La cinemática de la pata de un insecto, en la mayoría de ellos, es de cuatro segmentos, como es el caso de las cucarachas, *Blaberus Discoidalis*. Las tablas 3.1 y 3.2 muestran los

rangos de movimiento y la longitud media de cada uno de los segmentos para esta especie. Estos datos indican que las patas medias y posteriores se mueven de forma similar. El coxa, primera pieza de la pata de un insecto, no se mueve mucho en éstas. Las patas delanteras, sin embargo, son notablemente diferentes: la unión cuerpo-coxa tiene una buena flexibilidad, pero la unión coxa-fémur no. Como resultado, el movimiento en la combinación coxa-fémur actúa como un segmento de la pata delantera más larga. Las patas que dan más fuerza a la hora de andar son las posteriores y las medias. Las delanteras facilitan el cambio de dirección y la búsqueda de obstáculos en la dirección del avance. Según esto, es razonable que no tengan todas las patas los mismos grados de libertad. [Quinn, 99]

Articulación	Pata Trasera	Pata Media	Pata delantera
Cuerpo-Coxa	8.1°±2.1°	13.2°±1.9°	33.9°±3.8°
Coxa-Fémur	70.2°±2.4°	43.0°±4.7°	8.6°±5.5°
Fémur-Tibia	68.0°±3.0°	26.2°±6.8°	23.8°±7.9°

Tabla 3.1 Rangos de las articulaciones de una cucaracha

El tarso de cada pata se divide en varios segmentos pasivos, y elásticos. Estas articulaciones son tan flexibles que el extremo del tarso es capaz de tocar la articulación del tobillo. Los ángulos que se indican son los que se usan durante el movimiento, no los máximos de cada articulación. Las medidas fueron realizadas por [Kram, 94] con la media de cinco insectos de la clase *Blaberus Discoidalis*.

Longitud segmento	Pata trasera	Pata media	Pata delantera
Coxa	6.08±2.1 mm	5.77±1.1 mm	7.2±0.17 mm
Fémur	10.6±0.2 mm	9.86±2.5 mm	7.65±0.14 mm
Tibia	12.8±0.3 mm	7.70±0.33 mm	4.18±0.16 mm
Tarso	8.02±2.7 mm	6.58±0.19 mm	5.39±0.10 mm

Tabla 3.2 Dimensiones de las patas de una cucaracha

Los diseñadores de robots, han asumido, tradicionalmente, que la pata de una máquina produciría una fuerza de reacción vertical en cada pie, tal y como se ve en la figura 3.5a ya que esto minimiza la cantidad de fuerza que debe ser generada. Full propuso, sin embargo,

que los insectos frecuentemente producen unas fuerzas horizontales opuestas con sus patas, tal y como se muestra en la figura 3.5b. Aunque parezca que la postura es ineficiente, realmente reduce el coste metabólico del insecto y en consecuencia produce un ahorro de energía.

La magnitud de las fuerzas que pueden generar los músculos de cada pata, se determina por el par de reacción sobre las articulaciones de las piernas. Si se tiene en cuenta que la fuerza aplicada en cada pie es vertical, el par es muy grande porque los insectos tienen una disposición muy ancha. Cuando las fuerzas están orientadas como se muestra en la figura 3.5b, el par resultante en cada articulación es menor, ya que se requiere menos fuerza del músculo, con lo que se reduce el coste metabólico del insecto. En cambio este efecto, obliga a que los músculos de la rodilla tengan que ser más fuertes. Son ellos los que tienen que proporcionar la componente horizontal para mantener erguido el cuerpo del insecto.

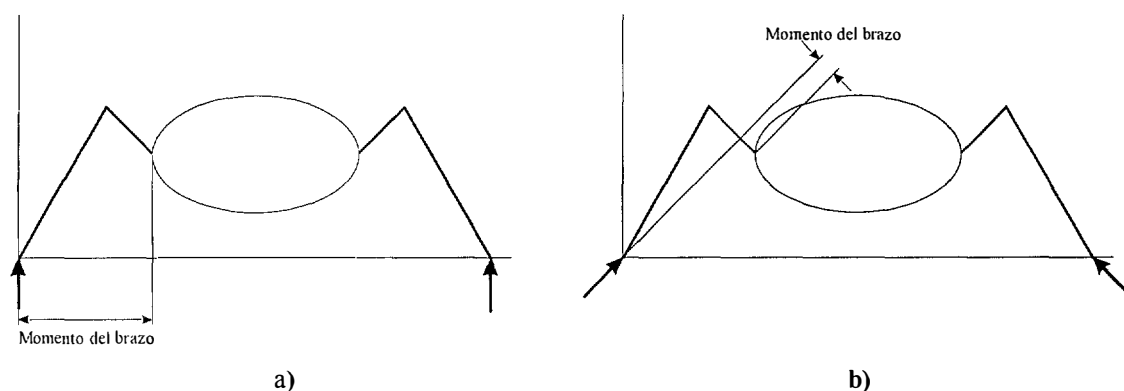


Figura 3.5 Disposición de los momentos producidos en las patas de un insecto

La parte derecha de la figura muestra la situación normalmente supuesta por los diseñadores de robots; cada pata produce una fuerza de reacción vertical que contrarresta a la fuerza de gravedad. Los insectos, sin embargo, producen fuerzas horizontales opuestas con sus patas. Aunque incrementa la cantidad de fuerza que el insecto genera, reduce las correspondientes a los pares de la articulación, lo cual baja los requerimientos de todas las fuerzas musculares, [Binnard, 95].

Full ha plasmado con acierto la dinámica de movimiento de las cucarachas cuando corren, [Full, 89], [Full, 90] y [Full, 91]. Los aspectos más sobresalientes de su estudio son:

- Las cucarachas producen unos patrones de fuerzas de reacción similares a los corredores de dos, cuatro, y ocho patas.
- Los insectos corren dinámicamente, e incluso solo con dos patas a velocidades altas.
- El centro masas oscila, en dirección perpendicular a la de avance. Los diseñadores de robots siempre han supuesto que la velocidad de movimiento se mantiene constante.

Los diseñadores de robots han creído, a menudo, que el movimiento casi estático en el que no hay cambios en la altura o en la velocidad del centro de masas de la máquina caminante, y el gasto de la energía es más eficiente. Full y su equipo demostró en estos trabajos que estas suposiciones no son necesariamente válidas.

[Yamauchi, 94] investigó la forma que tenían las cucarachas de subir escalones. Encontró que los insectos, algunas veces se paran antes de subir (locomoción discontinua), y otras ascienden sin parar (locomoción continua). Las fuerzas que se generan en ambos casos muestran las mismas características:

- Las patas delanteras producen poca fuerza durante las maniobras.
- Las patas medias producen una gran fuerza vertical, en dirección hacia el centro de masas, para levantar el cuerpo, hasta que las patas delanteras rebasan el obstáculo.
- Una pata intermedia y su opuesta posterior producen las fuerzas para saltar el cuerpo al nuevo escalón.
- A veces, durante la subida, cuando hay menos de tres patas en la tierra; la subida no es un proceso cuasi-estático.

Los insectos son animales muy estables. Gracias a que las patas son muy extensas, los puntos de apoyo están muy alejados unos de otros, que junto con el gran número de patas que poseen, consiguen una buena estabilidad estática en muchas situaciones. Las cucarachas, y otros muchos insectos, tienen una postura ancha y baja. Con esta configuración son capaces de mantener una estabilidad estática incluso a altas velocidades y sobre superficies muy

inclinadas. Para la cucaracha *Blatta Orientalis*, el polígono de soporte es mucho más grande en comparación con el tamaño del cuerpo, aunque tenga alguna pata amputada [Wilson, 66].

3.3 Distintas adaptaciones del caminar

3.3.1 Adaptaciones para conseguir una mayor velocidad

La velocidad que consigue un animal se conoce como el producto de la longitud de la zancada por el ratio de zancadas por unidad de tiempo (ritmo de zancadas). En esta definición, la zancada puede ser un brinco o un salto si el animal se levanta del suelo. La velocidad se puede incrementar de dos formas distintas: aumentando la longitud de la zancada, incrementando el ritmo, o ambas cosas a la vez.

La forma más obvia de incrementar la longitud de la zancada es usar patas largas. Este método solamente funciona si el ritmo de zancadas, y la velocidad angular de la pata, se mantienen. Uno de los factores que afectan a la media de la velocidad angular de la pierna es su inercia, así que si la pierna se hace más larga debe ser más delgada para no reducir la velocidad. El precio que se paga es la pérdida de potencia en las piernas. A los animales que tienen las patas delgadas para poder ser más rápidos, Hildebrand los denominó cursoriales, [Hildebrand, 95].

La efectividad de la longitud de la fuerza puede ser incrementada de varias maneras. Una forma muy simple de conseguirlo es si el animal se apoya en el suelo solo con los dedos, y el resto del pie se alinea con el resto de la pierna. Tales animales se llaman digitígrados. Se puede alargar aún más si el animal es capaz de mantenerse sobre la punta de los dedos extendidos. Esta postura se puede encontrar en los animales que tienen pezuñas, los llamados ungulígrados. Una segunda forma, se consigue si el omóplato puede convertirse en una parte activa giratoria de la pata delantera, y así se aumenta, relativamente, la longitud del segmento de la pierna, figura 3.6.

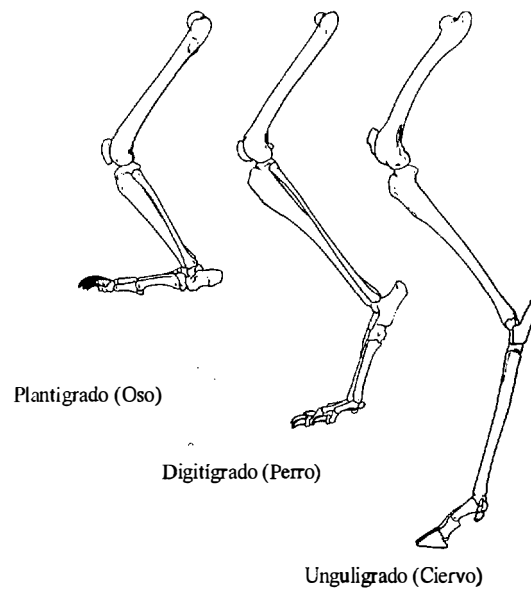


Figura 3.6 Diferentes longitudes de piernas según el tipo de apoyo

Para una pierna con una longitud dada, también es posible incrementar la zancada. Lo primero es aumentar las velocidades angulares de dos o más articulaciones. En vez de girar la pierna como un miembro rígido desde la cadera o el hombro, todos los segmentos de la pierna giran simultáneamente sobre las articulaciones en la rodilla, tobillos etc. resultando que la punta de la pierna gira un ángulo mucho más grande de que lo que haría con una sola articulación. Esto se muestra en la figura 3.6. Hay que hacer notar que para una pierna con muchas secciones, en un animal con una adaptación cursorial, los segmentos distales, que son las partes más alejadas de la base del miembro (tarso y metatarso), son más largos y más delgados que los proximales, los más cercanos a la base del miembro (fémur). En estos casos, es más importante reducir su inercia que la proximidad de los segmentos ya que así se mueven más rápido. Por la misma razón, es mejor que la masa muscular esté concentrada cerca del cuerpo y los tendones sean largos para poder actuar en las articulaciones más distantes. Hay otras adaptaciones para reducir la masa de las patas, pero muchas de ellas no son relevantes para el diseño de robots.

El rango angular de cada articulación individual puede ser aumentado (y así, su velocidad angular también) si la inserción del músculo se encuentra tan cerca de la

articulación como sea posible, tal y como se muestra en la figura 3.7. Si el actuador puede manejar la carga a la misma velocidad absoluta, producirá una gran zancada en el mismo periodo de tiempo, ya que está unido junto a la articulación.

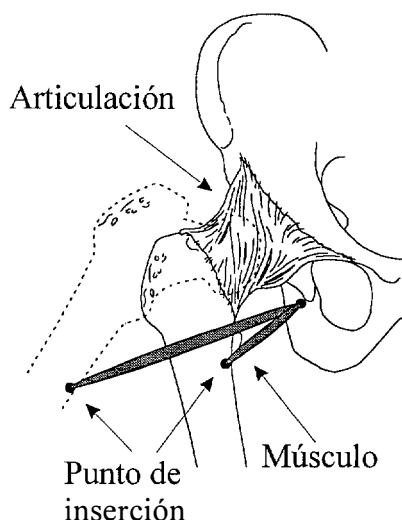


Figura 3.7 Diferentes rangos de apertura según el punto de inserción del músculo

Otra forma de incrementar la longitud de la zancada es tener una espina dorsal flexible, o con una articulación. Los lagartos y lagartijas doblan sus columnas vertebrales en el plano horizontal pivotando sobre el pecho y las caderas, de forma que se convierte en una articulación extra. Algunos mamíferos doblan sus espinas dorsales en un plano vertical para acortar y alargar alternativamente la distancia entre las patas traseras y delanteras, añadiendo en el galope un incremento a la zancada. La espina dorsal del leopardo es un buen ejemplo; se adapta muy bien para maniobrar y podría correr teóricamente a 10 km/h aunque le faltase alguna de su patas, solamente con el movimiento de su espina.

3.4 Adaptaciones para desplazarse escalando

Los escaladores tienen dos necesidades básicas:

- Deben moverse sobre un entorno tridimensional no estructurado
- Deben evitar una caída

Los animales que andan y corren también se mueven sobre superficies irregulares, y deben evitar caerse, así que no es extraño que las adaptaciones estructurales y de comportamiento de los escaladores, por lo general, no difieran mucho de las adaptaciones de otros animales. De hecho, muchos escaladores no presentan grandes diferencias en sus hábitos locomotores, respecto de los caminantes. En muchas especies, la capacidad para escalar se combina con otras: por ejemplo, el leopardo escala y corre velozmente, el canguro de los árboles también salta, el oso hormiguero también excava, la rana de los árboles también nada. Sin embargo, algunos escaladores (ranas de árboles, varias salamandras, dragones, varios murciélagos, etc.) utilizan mecanismos únicos, diferenciándose de otros de forma notable.

Los animales escaladores tienen diferentes métodos para moverse sobre superficies discontinuas tales como: saltar, brincar, balancearse, o extenderse y encogerse. Para evitar caídas poseen diferentes adaptaciones para las acciones anteriores, y para sujetarse a las superficies verticales tales como: abrazarse (a una rama o un tronco), crear vacío, usar sustancias pegajosas, o usar garras o ganchos. Los métodos de movimiento y agarre se combinan de muchas maneras (extensión o balanceo con agarre, balanceo con el uso de ganchos, correr y agarrarse con sustancias pegajosas, etc.). Pero antes de comentar las distintas formas de propulsarse y agarrarse, será muy útil hacer una breve reseña de los principios que un animal escalador utiliza para ponerse en contacto con superficies inclinadas, ramas o troncos de árboles. En concreto se va a comentar el importante papel que juega la fricción, el entrelazado y la adhesión en el agarre.

3.4.1 La fricción

Cuando un mono se encuentra sobre un tronco horizontal con las patas debajo del cuerpo, su peso se iguala con una fuerza de reacción hacia arriba que lo soporta. Hay una fuerza de compresión en la unión entre el tronco y el pie, pero no hay ninguna tensión tangencial. De acuerdo con esto, no hay deslizamiento en ningún apoyo. El empuje del pie contra el tronco T , y su fuerza de reacción N que es normal a la superficie del tronco tienen

igual valor pero sentido opuesto (figura 3.8a). Todo esto, también es cierto en un caballo que se mantiene de pie, así que de momento no hay ninguna diferencia entre un animal que camina o escala.

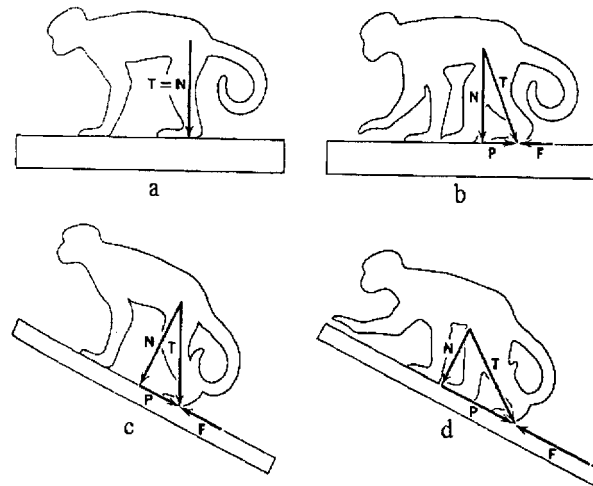


Figura 3.8 Fuerzas producidas durante el movimiento

Si el mono pasea a lo largo de un tronco horizontal, entonces el pie empuja contra la superficie en un ángulo respecto a la vertical. Este vector de fuerza se puede descomponer en una componente normal a la superficie y otra que es tangente, o paralela a la superficie (P en la figura 3.8b). Si la pata no desliza, la fuerza P debe contrarrestarse con una fuerza de fricción igual, F , que es la resistencia mecánica al movimiento del pie a lo largo de la superficie de apoyo. Un caballo es capaz de pasear simplemente porque la fricción se opone a las fuerzas de propulsión a lo largo del terreno.

Si el mono se mantiene sobre una rama que está inclinada respecto de la línea horizontal, la fuerza T puede descomponerse en N y P aunque no haya movimiento (figura 3.8c), y la fuerza de fricción es necesaria para mantener el pie con una fuerza de deslizamiento pequeña sobre la rama. Si el mono pasea sobre una rama inclinada, N disminuye y P se incrementa (figura 3.8d). Consecuentemente, la fricción debe incrementarse si el mono quiere evitar deslizarse o caerse. Ahora, el mono y el caballo tienen soluciones

distintas. Es evidente que las adaptaciones para escalar deben incluir mecanismos que maximicen las fuerzas de fricción.

La fricción es un fenómeno complicado que no se presta a un análisis exacto. La fricción máxima permitida antes de que un objeto deslice sobre otro depende de las clases y texturas de los materiales en contacto, y de las fuerzas que actúan sobre ellas. La relación aproximada para superficies secas y rígidas es $F=\mu N$, donde μ es el coeficiente de fricción, el cuál se determina empíricamente para la combinación de dos materiales. Sin embargo, si una de las superficies está curvada y es viscoelástica (tiene ambas propiedades: viscosidad y elasticidad) como ocurre en la planta de los pies de los animales, la expresión se convierte en $F=\mu N^\alpha$, donde $\alpha < 1$. Ahora, si N se incrementa, μ se decrementa, y es más probable que se produzca el deslizamiento. En esta circunstancia, el animal no puede evitar una caída aunque se agarre más fuerte. También se sabe que μ decrece si empieza el deslizamiento; por tanto, hay que tener en cuenta que es más fácil prevenir el deslizamiento que pararlo.

Es obvio que de la fórmula $F = \mu N$, los escaladores pueden incrementar la fuerza de agarre F de dos formas distintas:

- seleccionando que la combinación entre las superficies de contacto tenga valores altos de μ ,
- desarrollando mecanismos para incrementar la fuerza N .

El primer método invita a un estudio más detallado. Presumiblemente, hay que tener un cuidado extra cuando la superficie a la que se agarra un animal está mojada, ya que la lubricación reduce enormemente la fricción (y altera la fórmula para su cálculo). Como se podrá ver más adelante, los escaladores son muy eficientes para incrementar N de varias formas. Esto no implica, sin embargo, un incremento en el peso del cuerpo. Los escaladores tienen un tamaño de medio a pequeño, por dos razones fundamentales: no romper las ramas que deben soportarlos y poder ser más ágiles.

Como muestra la fórmula, la máxima fricción tiende a ser independiente del área aparente de contacto. Incluso las superficies muy pulidas, tocan en una pequeña fracción del área de contacto aparente. Si el área visible de contacto disminuye, la presión sobre la que queda se incrementa y hay muchos puntos microscópicos que son forzados a entrar en contacto. Esta es la razón por la que un antílope puede saltar sobre las rocas apoyándose en las puntas de sus diminutas pezuñas. Sin embargo, algunos escaladores tienen las plantas del pie muy grandes, por lo cuál se reduce la abrasión, por unidad de área, del integumento. Normalmente las plantas acaban en unas almohadillas flexibles que tocan a la superficie de contacto en varios planos, incrementando así la estabilidad en el agarre. El pie está listo para resistir, usando la fricción, las fuerzas que aparecen desde direcciones diferentes, e intentan separar al animal de la superficie a la que está sujeto.

3.4.2 El entrelazado

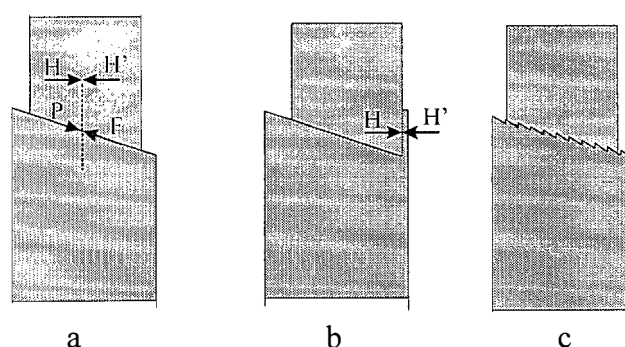


Figura 3.9 Fuerzas de entrelazado

Si se ponen en contacto dos superficies lisas inclinadas respecto de la línea horizontal, tal y como se muestra en la figura 3.9a, hay una fuerza P , paralela a los planos de contacto que debe ser opuesta y con el mismo valor a una fuerza de fricción, F , que debe evitar el deslizamiento. La fuerza P tiene una componente horizontal H , que es la que realmente provoca el deslizamiento, si no fuese contrarrestado por H' . Si la superficie de agarre tiene una pequeña pared, como se muestra en la figura 3.9b, la unión entre los dos planos laterales proporciona esta fuerza. En este caso el entrelazado ayuda a la fricción a conseguir la

estabilidad en el agarre. Un ejemplo claro de esta situación ocurre cuando la garra de una iguana o una ardilla se introduce en la grieta de una rama o una roca.

Si los objetos que se ponen en contacto tienen muchas superficies pequeñas solapadas, como si fuesen muchas paredes planas, figura 3.9c, ocurre el mismo efecto comentado anteriormente. Igualmente, cuando la parte callosa de la cola de ciertas ardillas hace presión sobre la corteza rugosa de un árbol se cumple el mismo efecto.

La fuerza de fricción también se basa en la entremezcla de puntos finos de contacto, con lo que las superficies de entrelazado se vuelven muy pequeñas (escamas o láminas, como en el caso del pie de una lagartija). En estos casos no hay gran diferencia entre lo que se conoce como fricción y entrelazado. El agarre mediante la almohadilla de un pie que se pone en contacto sobre una rama se vale también de las propiedades de la fricción y el entrelazado; si una garra tiene un borde afilado y puede hacer un pequeño corte en una rama, el entrelazado también ayudará al agarre.

3.4.3 La adhesión

La adhesión es consecuencia de las atracciones que se producen entre las moléculas de diferentes materiales. Hay dos clases de adhesión usadas por los animales escaladores. La **adhesión capilar**, o adhesión húmeda, cuando hay una película fina de cualquier líquido entre las dos superficies que se quieren unir. Así, dos cristales se adhieren bien si entre ellos hay una película fina de agua. La experiencia común muestra que los materiales viscosos son mejores adhesivos que el agua, y las almohadillas de los dedos de algunos anfibios segregan un material pegajoso que los une a hojas verticales que son suaves y poco rugosas.

La otra clase es la **adhesión seca**. Cuando un metal suave desliza sobre otro, en ciertos puntos microscópicos de contacto se pueden producir presiones y temperaturas que pueden llegar a formar vínculos moleculares de contacto, microsoldaduras. Esta es otra base de las fuerzas de fricción. Normalmente, sin embargo, los materiales secos no se pueden

acercar lo suficiente, incluso con las superficies limpias y pulidas, para obtener las necesarias microsoldaduras entre ellas. Hay una familia de dragones y lagartijas que pueden subir por cristales verticales usando la adhesión seca. La estructura altamente especializada de sus pies les capacita para establecer atracciones intermoleculares, fuerzas de Van der Waals, con la superficie de agarre, sin necesidad de ninguna sustancia pegajosa.

3.5 Tipos de locomoción en los animales escaladores

3.5.1 Pasear, correr, saltar y brincar

Los animales que comúnmente pasean o corren a través de ramas, más o menos horizontales, (iguanas, ratones de árboles, osos hormigueros) tienen los mismos problemas que los considerados terrestres. Los pies, y algunas veces la cola, pueden poseer alguna modificación para agarrarse mejor a los troncos y ramas de los árboles, pero el resto del cuerpo no es distinto de uno terrestre.

Algunos escaladores se mueven dando saltos de una rama a otra. El salto puede ser hacia arriba, pero casi siempre es hacia un lado o hacia abajo. El animal puede moverse cuando inicia el salto, y colocar el cuerpo más o menos horizontal a la hora del despegue. Como ejemplo de estos animales se pueden mencionar ciertas serpientes arbóreas, numerosas lagartijas, ardillas de árboles, y los monos capuchinos, probóscideos; o languros arbóreos. Estos escaladores (excepto las serpientes) tienen brazos largos, huesos delgados y finos, y una mecánica muscular similar a los de los animales denominados cursoriales, aunque los segmentos proximales de los brazos suelen ser más largos. La columna vertebral es relativamente larga, fuerte y flexible.

Algunos primates, mientras descansan tienden a mantener en cuerpo en una posición vertical, y están frecuentemente quietos antes del despegue. El salto puede ser en cualquier dirección incluyendo pendientes muy acusadas. Estos animales altamente especializados son

los tarseros, y dos géneros de lemures. El más pequeño de estos prodigiosos saltadores puede llegar a alcanzar hasta 2 m de altura en dirección vertical, y el más grande de ellos puede llegar a los 10 m hacia abajo y afuera de un árbol a otro. Todos tienen las patas traseras muy largas, la postura de las rodillas está flexionada, y en general tienen la misma mecánica en las piernas que los saltadores terrestres, y el fémur es igual de largo que la tibia.

3.5.2 Extenderse, empujarse, colgarse

Muchos de los escaladores mejor adaptados se empujan totalmente o en parte extendiéndose desde una rama a otra. Los espacios grandes pueden ser salvados sin necesidad de perder un agarre seguro en una de ellas. Es decir, el animal se agarra a otra rama sin soltar a la que ya está cogido. El orangután, los potos, los lorises, y los perezosos son ejemplos notables de animales que usan este método de locomoción. Hay evidencias de que la forma de escalar del orangután es igual a la que usaban los ancestros del hombre.

Estos animales deben reunir tres características principales. La primera, poseer un largo alcance de los brazos y piernas para poder cogerse al siguiente punto de apoyo. Por eso, las patas son más largas que las de cualquier otra adaptación locomotora, a excepción de los animales que vuelan (extremidades anteriores), planean o saltan (extremidades traseras). Los segmentos proximal y mediano de las extremidades son casi iguales en longitud. Los pies son grandes, ya que deben responder más a necesidades de agarre que de movimiento, así que no se alargan como se hacen en los cursoriales y en los saltadores terrestres. El tórax también tiende a ser grande

La segunda necesidad es la flexibilidad y agilidad. Poseen mucha fuerza y una gran maniobrabilidad en cualquier dirección. Por esta razón, las cabezas del húmero y el fémur de estos animales son mucho más esféricas que las de los cursoriales o los voladores, asemejándose a la articulación esférica de una máquina. Las caderas de algunos reptiles están modificadas para permitir más libertad de movimiento. El cubito y el radio están libres y tienen el mismo nivel de desarrollo para asegurar la máxima pronación y supinación del

antebrazo. La articulación de la muñeca es elipsoidal, y no rotacional, con lo que se mejora la movilidad de la mano a la hora de alcanzar una rama desde cualquier posición del brazo.

Tercero, estos escaladores necesitan una mecánica músculo-hueso apropiada. No se necesita mucha fuerza, así que los músculos y los tendones no son grandes, y los huesos son ligeros y finos. Muchos de estos animales, y particularmente los perezosos, comúnmente toman posturas en las que los músculos extensores no se oponen a la gravedad, por lo que estos músculos están menos desarrollados que en los mamíferos terrestres. Los flexores, pronadores, y abductores sí están mejor desarrollados.

3.5.3 Balanceo de brazos

Algunos primates se propulsan por el balanceo de sus brazos desplazándose siempre por debajo de las ramas. A diferencia de otros métodos de movimiento, solamente se usan las extremidades delanteras para el soporte. El balanceo de árboles está muy bien reflejado en los gibones, aunque también es usado en algunas ocasiones por los monos arañas, lanudos, languros, y por los chimpancés, los orangutanes y raramente los gorilas.

Con una mano se agarran a la rama dejando el cuerpo por debajo de ella, el escalador se balancea al igual que un péndulo, girando su cuerpo casi 180° sobre el brazo. Al final del balanceo, estira el otro brazo a otra rama que esté por encima de su cabeza. Durante el movimiento del balanceo hacia abajo, el animal mantiene el brazo libre y las piernas extendidas para situar el centro de gravedad lo más lejos posible del punto de giro y conseguir mayor velocidad y energía cinética. Al tiempo que se mueve hacia arriba, el brazo libre y las piernas están flexionadas para acortar el péndulo, disminuir el momento de inercia, e incrementar la velocidad angular. En una marcha rápida el animal se agarra de una a otra rama, intercalando un corto espacio de tiempo sin estar agarrado, al igual que un acróbata.

Los animales que utilizan el balanceo de brazos tienen las mismas adaptaciones que los que usan el segundo método de escalado, solamente que las modificaciones son más

acentuadas. Las extremidades posteriores son mucho más largas que el tronco, especialmente en los monos gibones y arañas, pero las anteriores son desproporcionadamente largas, llegando incluso a tener dos veces o más la longitud del cuerpo en el caso de los orangutanes y gibones. Ya que los brazos están sometidos a grandes esfuerzos a tracción, sus huesos tienden a combarse o torcerse; pero son más finos que los que trabajan a compresión. La supinación del brazo que está soportando el peso junto con el giro del tronco hace que el hombro de la otra extremidad que está libre se acerque al nuevo punto de agarre. Para facilitar esta acción, el músculo supinador es muy fuerte, y el par que produce se ve aumentado por la inclinación del hueso radio.

La articulación del hombro permite movimientos de los brazos hacia delante y hacia los lados, pero nunca hacia atrás. Los músculos pectorales, los dorsales, el bíceps, y el tríceps refuerzan esta articulación contra las tensiones que tiene que sufrir. A diferencia de los animales cursoriales y los cuadrúpedos saltadores, tienen una espalda corta y compacta, para que el tronco pueda balancearse como una unidad.

3.6 Mecanismos de agarre

Las patas de los insectos están a menudo modificadas para hacer funciones especiales. Las formas terrestres tienen patas marchadoras con almohadillas terminales y uñas como en los escarabajos. Estas almohadillas pueden ser pegajosas para caminar sobre cualquier superficie, como hace la mosca doméstica. Las patas posteriores de los saltamontes y grillos están adaptadas para el salto. Algunas pequeñas criaturas, como los geckos y las salamandras, tienen discos adhesivos en los dedos, que les permiten caminar por superficies verticales o techos. Aunque la mayoría de los animales usan garras para sujetarse a la corteza de los árboles. Muchos otros poseen almohadillas en las patas, y gracias a las pequeñas rugosidades de la madera pueden agarrarse bien. Además, muchos poseen colas prensiles que también les ayudan a moverse por estas estructuras agarrándose o descolgándose con ellas. En cuanto a su estructura, es un poco distinta de los animales terrestres que sólo caminan. Suelen tener las

extremidades más abiertas que los mamíferos, y arqueadas, lo que les permite abrazarse mejor a los troncos de los árboles, consiguiendo que su centro de gravedad siempre esté muy cercano a él. Los dedos, normalmente muy largos, son curvados para adaptarse a la forma de las ramas. En algunos casos, tienen un dedo enfrentado, opuesto, a los otros para agarrarse en forma de pinza. Hay diferentes tipos de agarre, que están en consonancia con el modo de escalar que tienen. Los más interesantes son los siguientes:

3.6.1 Agarre por presión

Cuando los dedos y la palma de un camaleón, un poto, o una persona rodean a una rama o un tallo y la agarran firmemente, los esfuerzos musculares generan fuerzas que son normales a la superficie de soporte. Estas fuerzas incrementan la fuerza de fricción que es contraria al deslizamiento: cuanto más ajustado es el agarre mayor es la resistencia. Un animal con flexores digitales muy fuertes puede complementar de esta manera, las fuerzas normales que solamente podría desarrollar con el peso de su cuerpo. Además, por agarre se puede resistir el deslizamiento en cualquier dirección.

El agarre es una forma muy versátil y efectiva de mantenerse en contacto con la superficie de sujeción. Los diferentes seres escaladores han evolucionado a diferentes mecanismos de agarre. El primer dedo es opuesto a los otros, en uno o ambos pares de pies de algunas ranas de árboles, salamandras, y en muchos primates, figura 3.10. El segundo dedo no es efectivo en la potencia de agarre, incluso en el hombre, y en algunos animales como en el poto se ha vuelto corto y débil. El koala, y otros desdentados, se agarran entre el segundo y el tercer dedo, como hacen los camaleones con las patas traseras. Las patas delanteras de estos lagartos se agarran entre el tercer y cuarto dedo. Las palmas, las plantas, y los dedos de los animales que usan este método están desnudos y son muy sensitivos.

Los mamíferos terrestres que se han convertido en arbóreos han sufrido interesantes evoluciones. Así, el pie del oso hormiguero puede formar una depresión en su talón que ofrecerá una gran fuerza de oposición a la de sus dedos restantes, y un puerco espín de

América Central puede doblar la almohadilla de la pata de su pie a lo largo de su eje longitudinal, y agarrarse fuertemente con los dos bordes laterales del pie.

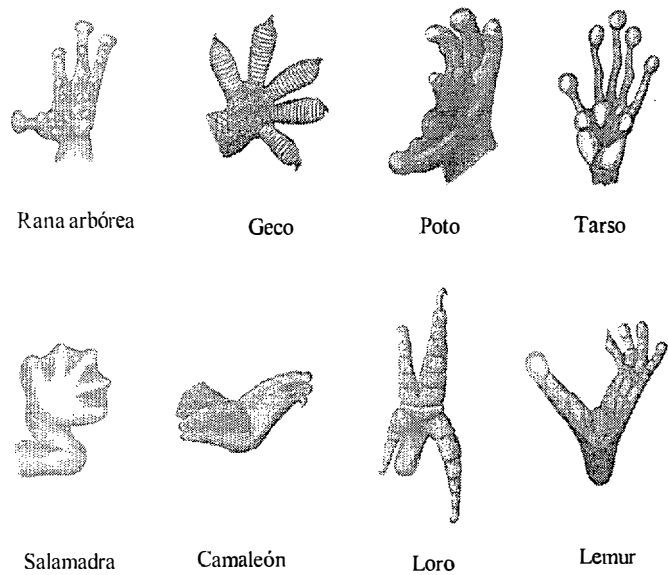


Figura 3.10 Manos (arriba) y pies (abajo) de diferentes animales escaladores

La cola a menudo evoluciona a un órgano de agarre. Tal cola se dice que es prensil, larga, fuerte, sensitiva, y curvada al final. Ejemplos de animales con colas prensiles son las salamandras, camaleones, y otros lagartos; monos capuchinos, arañas, y lanudos; osos hormigueros; pangolines; y una variedad del puerco espín. Muchos de estos animales curvan la cola ventralmente, pero el puercoespín dobla su cola dorsalmente. Las colas prensiles tienden a ser flexibles en la base, con vértebras anchas y muy cortas al final.

3.6.2 Agarre por balanceo, braceo, y succión

Los escaladores que se mueven más rápido son los balanceadores, que incrementan su estabilidad bajando el centro de gravedad. Las salamandras arbóreas, las serpientes, los lagartos pueden mantener el centro de gravedad muy bajo. Las ardillas de árboles, y los titís tienen las patas cortas o las mantienen flexionadas para mantener el cuerpo bajo. La cadera

del camaleón facilita que las patas se coloquen verticalmente debajo del cuerpo, cosa inusual en los reptiles como se vio en el epígrafe 3.2.1, así que el animal puede caminar sobre tallos muy angostos. Muchos escaladores tienen colas largas que contribuyen al mantenimiento del equilibrio.

Las plantas de los pies de muchos escaladores son grandes, blandas, y amortiguadas. A menudo están rugosas debido a pequeñas estrías o huellas que incrementan la fricción y el entrelazado. En concreto, están especialmente bien desarrolladas en los primates, osos hormigueros, y puerco espines. Las yemas de los dedos son grandes en algunas salamandras arbóreas, falangerinos, potos, y tarseros. Los escaladores con colas prensiles tienen partes blandas o yemas, en la cola. Los pies que tienen almohadillas tienden a ser anchos, con los ganchos bien colocados para que no interfieran con la acción de las almohadillas.

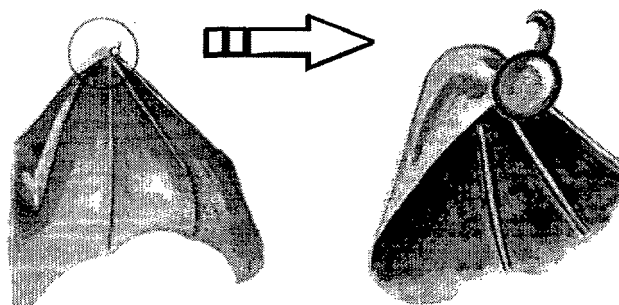


Figura 3.11 Ventosas de vacío de un murciélago

Dos géneros de murciélagos poseen un mecanismo que funciona igual que las ventosas de vacío creadas por el hombre. Tienen forma de disco, y están colocadas en las alas, sobre los nudillos y los tobillos, figura 3.11. El tejido elástico, sin tensión muscular, mantiene el vacío con el disco una vez asentado éste sobre la superficie de agarre.

3.6.3 Engancharse, pegarse

Muchos escaladores que no se agarran usando la fuerza, utilizan ganchos curvados que se enganchan a la superficie. Las puntas de las garras se entrelazan con pequeñas ranuras

y grietas sobre los árboles o las rocas. En los troncos grandes, las garras son más seguras que los dedos de agarre. Si el peso del animal es demasiado grande como para ser capaz de mantenerse firmemente entrelazado, hay un grupo de garras que se empujan unas contra otras para conseguir el agarre deseado. Los pies pueden colocarse a los dos lados del cuerpo, o girar los traseros hacia atrás, y así los ganchos posteriores pueden empujar contra los anteriores, o se quedan situados haciendo una fuerza contra la gravedad. Esta capacidad tan importante resulta de la adaptación de las articulaciones de la cadera y el tobillo, y de las articulaciones con el tarso. Estos casos se aprecian en las ardillas, varios marsupiales, primates muy bajos en la evolución, y varios carnívoros.

Algunos escaladores modifican sus apéndices transformándolos en ganchos y se cuelgan bajo los troncos. Los perezosos y los pangolines usan de 1 a 3 garras muy largas, fuertes, y curvadas como si fueran ganchos. Los primates que se balancean usan los cuatro dedos de la mano juntos como un gancho. La mano es muy larga, y las falanges están curvadas para conformar una sección que pueda rodear las ramas de los árboles. Las colas prensiles pueden ser usadas como ganchos trabajando como si fueran órganos de agarre. Los tendones de los músculos flexores de la garra son lo suficientemente cortos como para prevenir que pueda abrirse; hasta tal punto que un gibón muerto puede estar colgado de su brazo, o un mono araña puede quedarse colgado por el final de su cola.

3.6.4 Agarre por adhesión

Las yemas de los dedos extendidos de las ranas arborícolas contienen unas glándulas que segregan un líquido pegajoso que usan como adhesivo para sujetarse a las rocas, hojas, ramas y tallos. Muchas salamandras tropicales tienen membranas entre sus dedos que están separados, con lo que consiguen una superficie grande muy adhesiva. Para romper el contacto, la membrana se curva hacia arriba desde los bordes o se sube desde su parte trasera. Las ranas tienen un segmento extra de cartilago o hueso en la parte final de la última falange que le ayuda a conseguir la sensación del grado de agarre que ha obtenido al sujetarse al tronco de un árbol.

El geco tiene garras afiladas con las que se engancha a superficies rugosas. Si la superficie está moderadamente inclinada, el animal puede mantener su posición por fricción. Sobre superficies más inclinadas esta criatura tiene uno de los mecanismos de agarre más notables y mejor adaptados de la naturaleza. Bajo cada pie hay de 16 a 21 laminillas imbricadas, al igual que las tejas superpuestas de un tejado, Figura 3.12. Sobre las superficies de las láminas hay más de 150.000 pelos cuya longitud va desde 30 a 130 μm de largo. Cada pelo se ramifica en 2000 cerdas o púas, y cada una de éstas tiene una especie de platillos que miden alrededor de 0.2 μm de diámetro. Hay en total más de 100 millones de estos platillos que tocan la superficie de contacto con los puntos de su borde. Una fuerza pequeña, que provenga del peso del cuerpo o del empuje muscular, basta para que los platillos finales se pongan en contacto con la superficie de agarre. Al final se producen tantos contactos que el animal se adhiere por la tensión superficial del material al que se agarra.

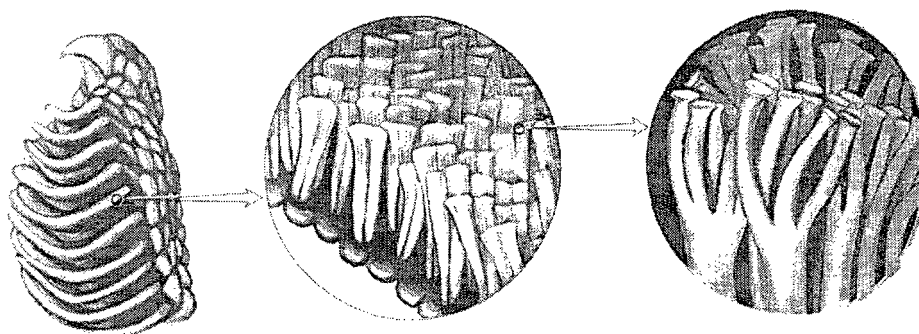


Figura 3.12 Laminillas de la piel de una garra de un geco

El contacto es tan fuerte que si una persona intenta despegarlo de una ventana, el cristal se rompe. La adhesión a un cristal vertical continua incluso aunque el animal haya muerto. Sin embargo, los lagartos se adhieren con dificultad a materiales que tengan una baja tensión superficial, como es el teflón, o si las láminas se secan o se descolocan, la capacidad de escalada se debilita hasta que muda la piel y reemplaza a la vieja. Para romper los contactos, el lagarto despega sus pies extra flexibles del substrato rodando sobre ellos "hacia atrás", empezando por las puntas.

Finalmente, la tablas 3.3, y 3.4 muestran un resumen de las características principales de los animales escaladores, vistas en los epígrafes 3.5 y 3.6, tanto desde el punto de vista de locomoción, como de las formas las agarre.

Locomoción
Caminar
Columna vertebral larga, fuerte y flexible Patas traseras muy largas y rodillas flexionadas <i>Lagartijas, ardillas, monos capuchinos, probóscideos</i>
Extensión
Patas delanteras y traseras muy largas. Pies grandes Tórax grande. Huesos ligeros y finos Articulaciones esféricas en la muñeca. Flexibilidad y agilidad en cualquier dirección <i>Orangutanes, potos, lorises, perezosos</i>
Balanceo de brazos
Uso acusado de las extremidades anteriores Propiedades más acentuadas que los que usan extensión. Huesos combados, tronco pequeño. Movimiento acortando y alargando su longitud <i>Monos arañas, lanudos, languros, chimpancés, gorilas</i>

Tabla 3.3 Características principales de locomoción

Agarre
Presión
Dedos desnudos, sensitivos y almohadillados. 1 ó 2 dedos opuestos a los demás Colas prensiles <i>Camaleón, poto, koala, monos arañas, lanudos, osos hormigueros, salamandras</i>
Balanceo, succión
Plantas de los pies grandes, blandas y almohadilladas Plantas de los pies con pequeñas estrías o huellas Colas largas. Ventosas de vacío <i>Ardillas, monos titís, murciélagos</i>
Gancho
Ganchos o garras Adaptaciones especiales en caderas y muñecas <i>Ardillas, marsupiales, perezosos, pangolines</i>
Adhesión
Glándulas en las yemas de los dedos. Secreción de un líquido pegajoso Láminas de unión por tensión superficial <i>Ranas, gecos</i>

Tabla 3.4 Características principales de agarre

3.7 Diferencias entre los seres vivos y las máquinas

Las secciones anteriores muestran diferentes aspectos de los que un diseñador de robots puede aprender mucho de la estructura y mecánica de animales que caminan y escalan. Sin embargo, la información así obtenida debe ser tratada con precaución; un desarrollo útil para un animal puede que no consiga la misma ventaja sobre una máquina. Aunque hay muchas más, las principales diferencias que se pueden observar entre un animal y el diseño de una máquina son:

1) Es fundamental la diferencia en cuanto al tipo de materiales usados. Los materiales de ingeniería son normalmente más fuertes que los biológicos, pero raras veces es únicamente una fuerza de tensión o compresión la propiedad más importante que debe poseer un material. Características tales como el trabajo de fractura o el ratio entre el módulo de Young y la densidad (E/ρ) pueden ser más importantes bajo ciertas condiciones de carga. Por ejemplo: aunque la fuerza de tensión del acero templado es más alto que la del tendón, su fuerza de tensión por unidad de peso es solamente dos tercios la de un tendón; y la E/ρ del hueso es de tres a cinco veces la de aleación de aluminio. De aquí, se puede deducir que una estructura hecha de huesos y tendones puede ser tan resistente, en cierta forma, para el peso que tiene que soportar y mover, como otra hecha de acero y aluminio.

Además, los procesos biológicos pueden producir formas complejas y materiales compuestos como un hueso esponjoso, donde la distribución de material es muy económica. Por otro lado, es posible construir una estructura mecánica que soporte esfuerzos más altos en puntos clave como puede ser un rodamiento o una articulación, debido a la fuerza del material.

2) Una estructura biológica puede frecuentemente limitar la fuerza a la que se ve sometida por una combinación de medir la carga y una acción muscular. En una máquina también se puede hacer, pero está mucho más avanzado en los animales.

- 3) Una ventaja que tienen las máquinas es que no consumen energía cuando sólo tienen que soportar su peso, y no se están moviendo. Un animal que esté quieto, sus músculos sí están trabajando para mantenerlo de pie o sujeto a una rama. Por tanto, los músculos se cansarán y sufrirán una fatiga, cosa que no ocurre en una máquina.
- 4) Algunos órganos de los animales tales como los músculos cumplen varias funciones simultáneas, aparte de trabajar como actuador, tales como almacén térmico, almohadilla, soporte para otros tejidos y reserva de energía.
- 5) Un actuador mecánico puede ser más pesado o más ligero que un músculo. Pero si se tiene en cuenta el equipo auxiliar que necesita: válvulas, electroválvulas, bombas, depósitos, reductores, etc., el conjunto es más pesado que un músculo. Sin embargo, tienen algunas ventajas: es capaz tanto de tirar como de empujar, puede poseer un gran ratio de extensión, proporciona una fuerza mayor para un área de sección dada, y se puede elegir entre un movimiento lineal o angular.
- 6) El control de la posición y velocidad de masas acopladas sometidas a bruscas aceleraciones está mucho más evolucionado en los animales que en las máquinas.
- 7) Los animales poseen actuadores lineales exclusivamente, siendo complejo de conseguir los movimientos giratorios. Al contrario que las máquinas que utilizan actuadores rotatorios o lineales a conveniencia.
- 8) Los grados de libertad de una pierna de cualquier insecto o animal, y en consecuencia, el número de músculos que posee, es siempre mucho mayor que el que pueda tener cualquier máquina. En definitiva, el nivel de integración de todos los elementos que están involucrados en el movimiento, es mucho mayor en un animal que en cualquier máquina.

3.8 Consideraciones generales sobre el diseño de los robots escaladores

Como se dijo en la introducción del presente capítulo, el movimiento de cualquier animal, ya sea caminando o escalando será mucho más elegante y avanzado que el que se pueda lograr actualmente con cualquier máquina. Pero si se puede extraer información del reino animal y mostrar al diseñador de robots escaladores que camino a seguir a la hora de diseñar su máquina.

La mayoría de los robots caminantes desarrollados hasta ahora tienen seis u ocho patas, los que están inspirados en los insectos, cuatro los que se inspiran en los mamíferos o en los reptiles, y dos los que intentan estudiar el modo de caminar del hombre. La mayoría de los insectos, cuando caminan, lo hacen disponiendo las patas en un triángulo formado por la primera y la última pata de uno de los lados, junto con la segunda del lado opuesto. De esta manera, los insectos mantienen siempre tres patas en contacto con el suelo, conformando un trípode, para lograr mayor estabilidad. El centro de gravedad se mantiene siempre dentro del triángulo que forman los tres puntos de apoyo, con lo que es mucho más fácil conseguir la estabilidad del cuerpo del animal. La consecución de la estabilidad se complica en un bípedo o en un animal de cuatro patas que esté al trote o al galope y no mantenga a la vez las tres patas en el suelo. En estos casos entran en juego el equilibrio dinámico de la inclinación del cuerpo y la velocidad que lleve el animal o la máquina.

En un robot caminante o escalador hay que estudiar diferentes aspectos en su diseño:

- Estabilidad en sus movimientos.
- Elevado grado de eficiencia energética, para conseguir la mayor autonomía posible.
- Gran modularidad.
- Alto grado de control en los movimientos y en el reconocimiento del entorno.
- Si el robot es escalador, su peso es un factor importante y cuánto menor sea mejor.
- Es importante que su coste no sea muy elevado, si el objetivo final es que tenga un uso industrial.

Como se vio en el capítulo 2, los diseñadores de robots escaladores siguen dos tendencias: unos usan plataformas planas, algunas divididas en dos partes, para realizar un cambio de plano, como es el paso del suelo a la pared. La otra corriente es dotar al robot de patas más largas y con mayor maniobrabilidad para moverse por entornos tridimensionales y hacer cambios de plano en cualquier dirección. A la hora de decidir el diseño del robot escalador o caminante, surgen diferentes interrogantes sobre diferentes elementos que debe tener el robot:

1.- ¿Cuántos grados de libertad necesitará el robot, y como estarán distribuidos?

Si el robot tiene patas habrá que decidir cuántos grados de libertad le corresponderán a cada una. No hay que olvidar que a mayor número de grados de libertad, mayor será la complejidad de su control, se necesitarán más actuadores y esto conlleva que el peso del robot se incremente.

2.- ¿Qué tipo de articulaciones se necesitan?

Dependiendo del tipo de agarre y de la forma de locomoción se pueden usar diferentes clases de articulaciones. Si se quiere un robot que escale con un movimiento de balanceo, se pueden usar articulaciones esféricas, en las muñecas (o tobillos) de sus patas al igual que los gibones o los orangutanes. Otra particularidad que tienen estos animales es la gran longitud de sus extremidades, que las alargan cuando van a alcanzar otra rama, y las recogen cuando quieren tomar más impulso durante el balanceo. En el caso de una máquina se puede variar la longitud de las extremidades con articulaciones de rotación, como tienen los monos, o telescópicas. Un ejemplo de máquina con este tipo de movimiento, igual que un gibón o un orangután puede verse en [Fukuda, 99]. Si se quiere un movimiento de extensión y encogimiento, al igual que hace una oruga o un ciempiés; se usará una articulación prismática. También se necesitarán articulaciones de rotación o esféricas que permitan el paso de un plano a otro.

3.- ¿Cuál es el tamaño adecuado del robot y de sus patas, si las tiene?

Aunque los animales escaladores son de cualquier peso y tamaño, los mejores son más bien pequeños y ligeros. Cuánto más pesados sean, exigen mayores esfuerzos para moverse, son más lentos y tienen peor maniobrabilidad.

Otro aspecto importante es la proporción del tamaño de las patas respecto al del cuerpo, lo cuál afectará a la forma de andar y agarrarse de diferentes maneras. Cuanto más largas sean, mayor podrá ser el alcance que tenga el robot, pero sus actuadores deberán desarrollar mucha más fuerza para sostenerlo, ya que al ser la extremidad más larga, más grandes serán los pares que se producen.

4.- ¿Las articulaciones serán reversibles o no?

Si las articulaciones se mueven por actuadores con poca potencia, pero con una gran relación de reducción, se obtendrán pares de fuerzas muy altos en el eje de salida. Normalmente, estos conjuntos actuadores-reductores pesarán menos que un actuador con mayor potencia y menor reducción a la salida. Con una articulación irreversible, el actuador no tendrá que consumir potencia para sostener los esfuerzos que habrá en el eje de salida de la articulación. Este aspecto ayuda a que el consumo de energía del robot sea menor.

5.- ¿Qué mecanismo de agarre se puede utilizar?

El agarre del vehículo está íntimamente relacionado con el entorno sobre el que se mueve. Por supuesto, otro factor importante es la forma de energía disponible en el robot, que usualmente, es aire comprimido o electricidad. Por paredes planas, lo mejor es usar ventosas de vacío o electroimanes si las superficies son metálicas. En árboles, puentes, andamios, o estructuras de edificios se pueden usar pinzas o ganchos además de los mecanismos anteriormente citados.

En este punto es donde quizás menos se asemeja el agarre que pueda tener un robot al que haya en el reino animal. Sólo dos especies tienen algo parecido a las ventosas de vacío, y como es obvio ninguno tiene imanes. Sin embargo, los ganchos, y las pinzas que hay en el reino animal están mucho más desarrolladas que cualquier mecanismo creado por el hombre (manos

artificiales, pinzas, ganchos, etc.) Tampoco hay ningún sistema de adherencia parecido al que usan los geos.

3.9 Conclusiones

En la primer parte de éste capítulo se ha hecho un análisis de las adaptaciones estructurales de tres grandes familias: los reptiles, los mamíferos y los insectos. Se han descrito las distintas disposiciones que tienen unos y otros a la hora de caminar y el esfuerzo que deben realizar. En el caso de los insectos se han expuesto los valores medios de las dimensiones de las patas y sus rangos de movimiento de un insecto. Estos datos sirven para tomar una idea de la capacidad de movimiento que tiene un insecto.

Con lo visto hasta ahora, se puede tener una idea clara de las distintas adaptaciones que tiene un animal a la hora de caminar, pero no de escalar. En la segunda parte de este capítulo se han expuesto las adaptaciones estructurales más significativas en el esqueleto o en el sistema muscular de los animales escaladores más conocidos. Así mismo, se presentan las diferentes formas de agarre que tienen los animales para “engancharse” a un tronco o a una rama de un árbol. Las formas de agarre que existen en la naturaleza, como se ha visto, son muy variadas, pudiéndose utilizar algunas en materiales artificiales. Otras como la de los geos, no son tan fáciles de copiar con las técnicas actuales.

Finalmente se han descrito las ventajas e inconvenientes que tienen los animales sobre las máquinas, teniendo en cuenta que no todo lo que hay en el reino animal se puede conseguir con las máquinas actuales.

Metodología de diseño de robots escaladores. Aplicación al robot ROMA

4

4.1 Introducción

Como se ha visto en anteriores capítulos, hay un gran número de centros de investigación dedicados al estudio y desarrollo de robots escaladores. La Universidad Carlos III de Madrid no es ajena a esta preocupación y en ella, pese a su corta existencia, se ha creado una línea de investigación dedicada a este campo. Dentro del proyecto “Desarrollo de un robot multifuncional auto-portable dotado de movilidad en entornos complejos (ROMA)” financiado por la CICYT, TAP95-0088, que fue concedido al Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, en el que se ha construido un robot capaz de moverse por estructuras tridimensionales. El objetivo de este proyecto es estudiar la viabilidad de un robot que se mueva por este tipo de estructuras, donde las tareas que se pueden desarrollar en ellas son muy variadas. En primer lugar, y como tarea más sencilla, con una simple cámara se

pueden tomar imágenes de la estructura, que vía radio se envían a un ordenador que se encuentra en la base de trabajo, y desde ahí, un operario puede comprobar cuál es el estado de la estructura.

En este capítulo se hace un análisis del entorno sobre el que el robot tiene capacidad para moverse, de las etapas de diseño y desarrollo del robot escalador ROMA, se hace una mera descripción de las fases de diseño del robot, y cuáles son sus características mecánicas y eléctricas. Se hará una breve descripción de su arquitectura hardware, que es un poco especial, con el motivo de reducir su peso total.

4.2 Metodología de diseño de robots escaladores

La primera especificación que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar un robot, es concretar cuál es el tipo de superficie sobre la que se va a mover el robot. Hay que reseñar que influirá tanto en la cinemática del robot como en el método de agarre que se puede aplicar. Junto con el estudio del entorno se deben estudiar cuáles son las operaciones de inspección y mantenimiento más comunes que se hacen en esa clase de entornos. De todas ellas habrá algunas que sean más fáciles de automatizar y otras no. Habrá que tener en cuenta también, cuál es el peso que tienen las herramientas que son necesarias en dichas tareas. Cuánto más pesada sea la herramienta, más difícil será automatizar dicha tarea, ya que el robot escalador podrá llevar un peso limitado en la carga.

Una vez especificado completamente el entorno en el que se va a mover el robot, se puede elegir cuál es la cinemática más adecuada para el robot que se pretende diseñar. Por ejemplo, si la superficie de escalado fuese totalmente plana, quizás bastaría una plataforma plana para moverse por toda la pared de un edificio o un depósito. Si el robot tiene que cambiar de una pared a otra o debe moverse por una estructura tridimensional, tendrá que tener una estructura cinemática distinta que le permitirá ir a cualquier punto de la estructura a escalar. Un

buen punto de partida para un diseño preliminar del robot, es fijarse en la forma de escalar de los animales vistos en el capítulo anterior.

Dependiendo del tipo de superficie a escalar se podrá elegir el tipo de agarre necesario. Si la superficie es plana se podrá usar ventosas de vacío, y si además es metálica existe la posibilidad de usar electroimanes. Si es una estructura tridimensional, como la de un sistema de tuberías, la vigas y columnas de un edificio, o de un puente se puede elegir también un agarre con pinzas o abrazaderas. A la hora de elegir uno de los tres, es conveniente pensar en cuál va a ser el tipo de actuadores que van a llevar las articulaciones del robot, por unificar el tipo de energía que va a llevar el robot.

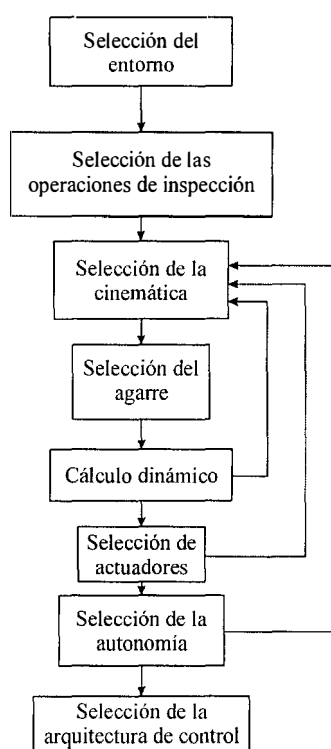


Figura 4.1 Esquema de metodología de diseño

Con todos estos datos definidos, se hace un cálculo del peso estimado del robot, y con la ayuda de cualquier herramienta de simulación dinámica se pueden calcular los pares necesarios en los distintos movimientos que debe realizar el robot. Normalmente los pares más altos serán los que sirvan para decidir los pares necesarios en cada articulación, y cuáles serán los pares

actuador-reductor de cada articulación. Además se podrá calcular la fuerza de agarre que se necesita para los actuadores que se encargan de sujetar el robot a la pared. A la hora de seleccionar el elemento de sujeción hay que tener en cuenta estos pares.

Con los datos calculados en el paso anterior, se buscan los conjuntos actuador-reductor que den el par necesario para cada articulación. En esta etapa, hay que elegir estos elementos con los pesos estimados en el cálculo dinámico. Si no existiese ningún elemento que fuese capaz de dar los pares necesarios habrá que volver a estimar un nuevo peso del robot y volver a calcular los esfuerzos dinámicos del robot con su nuevo peso. Este proceso habrá que repetirlo hasta que se encuentre el actuador que de el par necesario para mover el peso estimado del robot. Una vez pasada esta etapa hay que ver si el sistema puede ser autónomo o no. Si la intención es que sí, hay que añadir a la hora de estimar el peso del robot hay que tener en cuenta el peso que debe tener la fuente de energía, baterías si los actuadores son eléctricos, o un compresor o un depósito de aire comprimido si son neumáticos.

Por último, hay que diseñar la arquitectura de control que va a llevar el robot. El avance de la tecnología electrónica actual permite elegir elementos muy ligeros y de gran potencia de cálculo. Como el robot escalador es un sistema móvil, hay que buscar un sistema que permita una comunicación fiable desde una estación base.

4.3 Entorno de trabajo del robot ROMA

4.3.1 Importancia del entorno y de las operaciones de inspección y mantenimiento

Las infraestructuras de edificios y obras civiles más comunes que necesitan de operaciones de inspección y mantenimiento son:

- Las estructuras metálicas de los edificios residenciales o industriales contruidos con vigas y columnas metálicas. Su geometría es normalmente un paralelepípedo de forma rectangular.

- Las cubiertas y techos de las estaciones de tren, aeropuertos, edificios singulares (teatros, polideportivos, bibliotecas, etc.). Su geometría tiene una forma tridimensional completamente libre.
- Los puentes metálicos de carreteras o de ferrocarriles. Su geometría tiene la forma de un paralelepípedo rectangular, donde casi siempre también hay vigas entre sus distintos vértices, para que la estructura tenga una mayor rigidez.
- Las plataformas petrolíferas metálicas y las plantas petroquímicas. Su geometría es, en muchos casos, muy parecida a la del punto anterior.
- Las torres metálicas de alta tensión, que tienen la misma forma que las dos anteriores.

Estructura	Geometría	Tareas de Inspección y Mantenimiento.	Sensores
Estructura de edificios	Paralelepípedos rectangulares	Soldaduras Tornillos Remaches	Visión Telémetro láser Rayos X
Techos y cubiertas	Entornos 3D complejos	Soldaduras Tornillos Remaches Tela impermeable	Visión Telémetro láser
Puentes	Paralelepípedos rectangulares o no, con crucetas	Soldaduras Tornillos Remaches Color (pintura)	Visión Telémetro láser Colorímetro
Plataformas petrolíferas y plantas químicas	Paralelepípedos rectangulares o no	Soldaduras Tornillos Remaches	Visión Telémetro láser
Torres de alta tensión	Paralelepípedos rectangulares o no, con crucetas	Soldaduras Tornillos Remaches Líneas y aisladores	Visión Telémetro láser.

Tabla 4.1 Entornos y aplicaciones más usuales para un robot que se mueva en estructuras tridimensionales

Hay una gran diversidad de operaciones de mantenimiento e inspección que se puede realizar en ellas. La inspección del ensamblaje de los diferentes elementos de la estructura durante su construcción y su inspección periódica es una de las principales tareas. Si la unión

de los diferentes elementos se hace por soldadura, tornillos, remaches u otra tecnología de fijación, es necesario inspeccionar la bondad y la fiabilidad de estas uniones. Lo mismo sirve para los techos y cubiertas, plataformas petrolíferas y plantas petroquímicas, planta químicas, torres de alta tensión, etc.. En el caso de los puentes metálicos una de las principales tareas de mantenimiento es la inspección del color de la pintura, para prevenir la corrosión de la estructura. La tabla 4.1 resume las diferentes estructuras por las que puede trabajar el robot que se desea diseñar y cuáles son las tareas que llevará a cabo.

4.3.2 Especificaciones del entorno para el robot ROMA

En las especificaciones del proyecto ROMA, se consideró que el robot debía moverse por estructuras tridimensionales, como las de un edificio (vigas o columnas) en construcción, ya sean de acero o de hormigón armado. También es útil para moverse por la parte estructural de un puente (sus vigas y columnas). No hace falta que la estructura esté construida en un material especial, ya que el robot se coge a ella por el efecto de compresión que hace contra ella. Solo basta que sea lo suficientemente dura para que las vigas o columnas no se deformen cuando las pinzas las aprietan

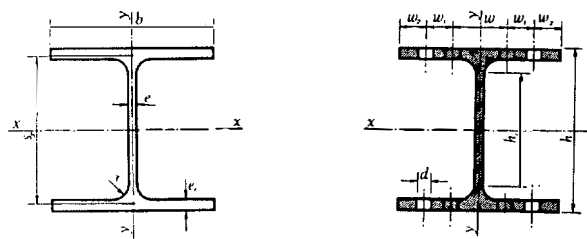


Figura 4.2 Perfil en doble T

El robot está especialmente diseñado para el movimiento en estructuras metálicas formadas por vigas en doble-T, aunque con un estudio adecuado, las pinzas se podrían cambiar por otras cuyo diseño les permitiese agarrarse a otro tipo de estructura. El ancho definido está entre los 20 mm del perfil del ala, hasta 10 mm de ala en la viga más pequeña. Dentro de este

rango se puede agarrar a cualquier perfil. En la tabla 4.2 y en la figura 4.2 aparecen cuáles son las dimensiones máximas y mínimas que tienen las vigas por las que se mueve el robot.

HEB	H	B	e	e _l	R	h _l
200	200	200	11	19	27	208
100	100	100	6	10	12	56

Tabla 4.2 Valores máximos y mínimos del perfil de una viga

En la industria civil hay muchas construcciones que necesitan una inspección de la calidad de la obra realizada, o de obras acabadas hace mucho tiempo que necesitan ser revisadas periódicamente.

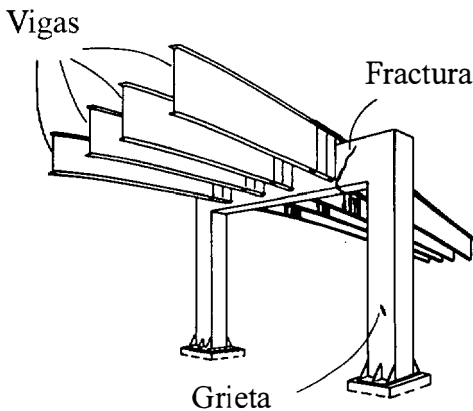


Figura 4.3 Puente con diversos defectos

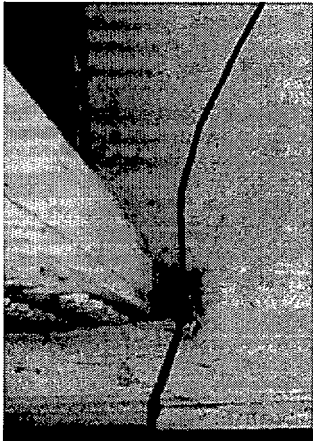


Figura 4.4 Imagen real de una grieta

Los procedimientos de inspección y supervisión del estado de una obra civil se pueden realizar usando técnicas invasoras o no. En el primer caso, se necesita tomar muestras del material que se estudia, con lo que se va a dañar la superficie en la que se trabaja. Ejemplos de este método pueden ser los taladros que hay que hacer para tomar muestras de polvo que se usan en posteriores análisis químicos. En las técnicas no invasoras, la inspección se puede hacer simplemente mediante una inspección visual, o tomando fotografías con una cámara, sin necesidad de ejercer ningún efecto activo sobre el medio a estudiar. En las figuras 4.3 y 4.4 se aprecian las grietas que se han producido en la estructura de un puente. [Fisher, 92]

4.4 Diseños preliminares para diseñar un robot capaz de moverse por vigas y columnas

Con el conocimiento recogido de los diferentes prototipos desarrollados en otros centros de investigación, y a partir de las diferentes estructuras cinemáticas que tienen los animales escaladores se han pensado diferentes configuraciones posibles que permitan recorrer completamente los entornos anteriormente descritos. Es importante resaltar que la geometría que presentan esta clase de estructuras condiciona en gran medida la cinemática que debe tener el robot.

El robot podrá realizar la mayoría de las aplicaciones señaladas anteriormente, para lo que estará dotado de una plataforma que incorporará el sistema de control y las herramientas. El robot debe desplazarse libremente como una oruga, o una araña en entornos tridimensionales, es decir, sus movimientos pueden ser tanto horizontales como verticales. Para poder conseguir este tipo de movilidad no se pueden utilizar los sistemas clásicos de locomoción. Existen varias propuestas de la configuración posible del robot, que son las que se presentan en este epígrafe.

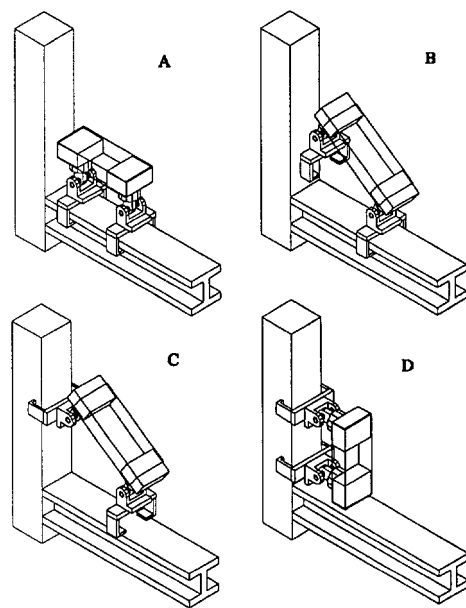


Figura 4.5 Configuración “pinzas”

En primer lugar, la configuración denominada “Pinzas”. Tiene dos o más pinzas con las que el robot puede agarrarse a la estructura, pero no desplazarse por ella. Por esta razón, deben ser móviles para permitir el cambio de los puntos de agarre, mediante por lo menos un grado de libertad más. En resumen, en esta propuesta, la estructura física del robot está formada por una plataforma con dos o más pinzas que contarán con dos posibilidades: 1) girar libremente sobre sus ejes de rotación para cambiar los puntos de agarre, y 2) desplazarse una respecto a la otra para conseguir el movimiento de la plataforma, figura. 4.5.

Otra de las posibles configuraciones que se tienen en cuenta es la denominada “Araña”. Esta configuración está formada por dos o cuatro patas con tres grados de libertad cada una, de tal forma que éstas se puedan adelantar al cuerpo y, por tanto, generar el movimiento del robot. Para garantizar la estabilidad del cuerpo del robot durante el movimiento de las patas, se le debe añadir un sistema de sujeción al cuerpo, preferentemente una ventosa o electroimán con gran capacidad de adherencia. Dicho sistema debe contar con el mecanismo de aproximación y retirada durante el movimiento del cuerpo, lo que añadiría un nuevo grado de libertad, figura 4.6.

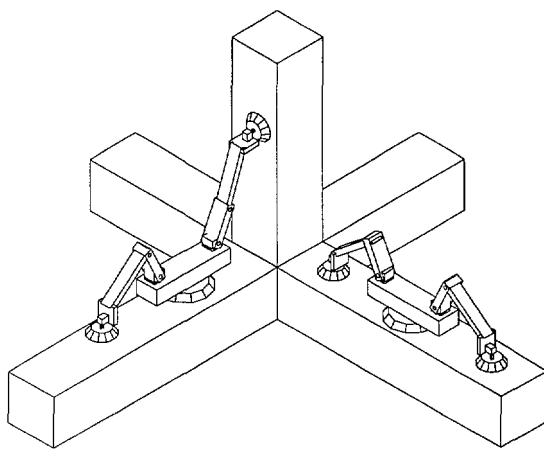


Figura 4.6 Configuración “araña”

En las dos configuraciones descritas, uno de los puntos críticos es la velocidad de desplazamiento de la plataforma, que no podrá ser muy alta. Por ello, en el diseño mecánico se debería incluir otro sistema complementario de locomoción rápida. Podrían estar basados

en el concepto de ruedas deslizantes u otro sistema similar. Un ejemplo de la utilización de los dos sistemas podría ser la utilización de la locomoción mediante pinzas en los cambios de una estructura a otra (cruces de vigas, vigas de diferentes dimensiones, etc.), y el uso de la locomoción rápida en desplazamientos sencillos (a lo largo de las vigas, etc.).

En este sentido, se propuso analizar la estructura denominada “Oruga”. El robot está formado por varios (mínimo tres) cuerpos unidos entre sí por 3 g.d.l. (grados de libertad). Cada cuerpo debe contar con un sistema de locomoción independiente, pero sincronizado con los demás. Este sistema se divide en dos sub-sistemas: a) sub-sistema de avance en estructuras lineales, y b) sub-sistema de estabilización de los cuerpos. El primero, puede estar formado por ruedas motrices, una o dos por cada cuerpo, con imanes permanentes, con lo que se consigue una adherencia durante el proceso de avance. El segundo, consistirá en unos brazos que se sujetan abrazando a la estructura en cada cuerpo, cuya misión será no solamente proporcionar la estabilidad adecuada de los cuerpos, si no también realizar, conjuntamente con los 3 g.d.l. citados, el cambio de dirección del movimiento, figura 4.7.

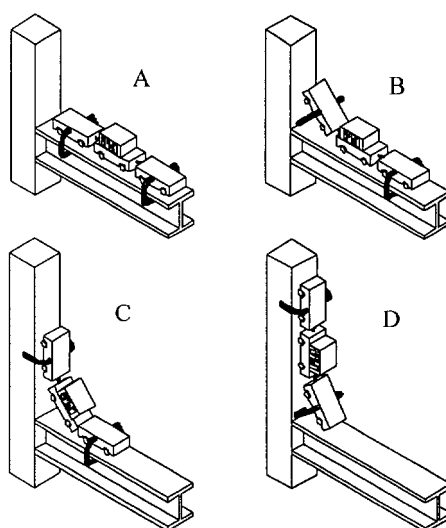


Figura 4.7 Configuración “oruga”

Otra posible configuración del robot ROMA, podría ser la denominada “Triciclo”. La idea principal consiste en tener una estructura triangular simétrica con ruedas en cada vértice.

Las ruedas y el sistema de locomoción con abrazaderas podría ser similar al del robot “Oruga”. La diferencia fundamental consiste en que el sistema de cambio de dirección se realiza mediante el movimiento de todo el cuerpo del robot, figura 4.8.

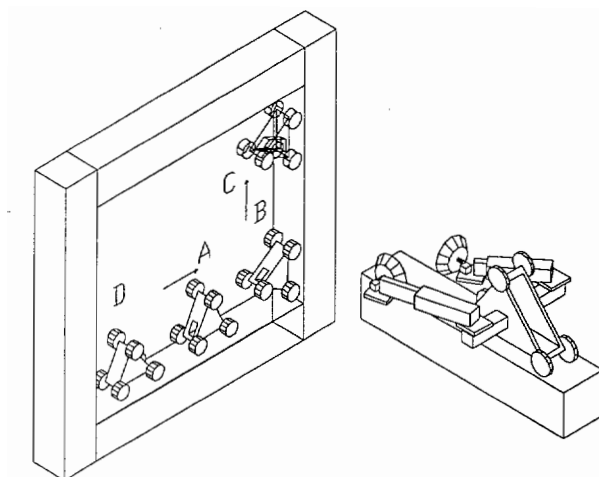


Figura 4.8 Configuración “triciclo”

Las configuraciones descritas plantean un gran número de objetivos parciales a resolver. En primer lugar, el diseño electromecánico del robot. Los principales condicionantes del mismo son muy diferentes a los sistemas tradicionales desarrollados, hasta ahora vistos en el capítulo 2. También hay que tener en cuenta el entorno por el que se va a mover el robot, ya que también tiene gran influencia en su futuro diseño, tanto en la cinemática, como en la mecánica y en su electrónica. En este caso, el diseño debe atender a los siguientes requisitos, muchas veces contradictorios:

1. Gran movilidad en entornos tridimensionales complejos. Esta especificación lleva a un robot con un número elevado de grados de libertad capaz de llegar a todas las zonas de la estructura
2. Alto nivel de autonomía en dos sentidos:
 - Autonomía en el sistema de control a bordo del robot que sea capaz de calcular la navegación del robot (planificación de caminos y tareas) por toda la estructura y la

realización de las tareas de inspección y mantenimiento de una forma autónoma sin ayuda del operador.

- Autonomía en la alimentación del robot. Este hecho limita el peso total del robot. Por otro lado, la estrategia de navegación del robot debe ser optimizada para ahorrar energía durante los movimientos, evitando repetir movimientos innecesarios.
3. El robot debe contar con el máximo número de elementos idénticos, con lo que se consigue mayor modularidad en el diseño y en el sistema de control, con el consecuente abaratamiento de los costes, tal y como se expone en [Virk, 99].
 4. El cuerpo debe ser lo más ligero posible, y cuánto menos pese, podrá escalar con un menor esfuerzo. Esto llevará a un detallado estudio de los materiales a utilizar, del número de g.d.l. y, muy especialmente, del tipo de agarre a utilizar, del tipo energía y de accionamiento, etc. La carga útil que puede llevar debe ser la mayor posible, con el objetivo de poder contar con el máximo número de herramientas portadas por el robot.
 5. Alto nivel de seguridad para evitar la colisión del robot con la estructura. Para este propósito se deben implementar algoritmos de planificación seguros y sistemas de control reactivos. Otro nivel de seguridad debe evitar la caída del robot que será posible con una estrategia de planificación de agarre adecuada.
 6. Sistema multisensorial para resolver dos problemas principales:
 - La navegación en entornos complejos tridimensionales. En este caso, los principales sensores que estarían a bordo del robot son: inclinómetros, acelerómetros, etc.
 - Las tareas de inspección y mantenimiento se necesitan los siguientes sensores: telémetros láser, cámaras (CCD, infrarrojos, etc.), colorímetros, rayos X, etc.
 7. Los sistemas de locomoción deben ser compatibles mecánicamente y estar controlados por algoritmos de control de colisiones, de tal forma que no se estorben durante el movimiento.
 8. Fácil programación del sistema robotizado. La entrada será la geometría tridimensional de la estructura escrita de una forma exacta o aproximada y la salida, la lista de las acciones que debe llevar a cabo el robot: movimientos, caminos, tareas, etc. Para realizar este punto, queda claro que se necesita una interfaz adecuada.

4.5 Diseño elegido

De los diseños posibles se ha elegido la del robot con pinzas con dos tipos de cinemática distintos, tal y como se ve en la figura 4.9. Los dos diseños tienen las mismas ventajas cinemáticas: con ellos se puede alcanzar cualquier cara de la estructura tridimensional, con un alto nivel de maniobrabilidad.

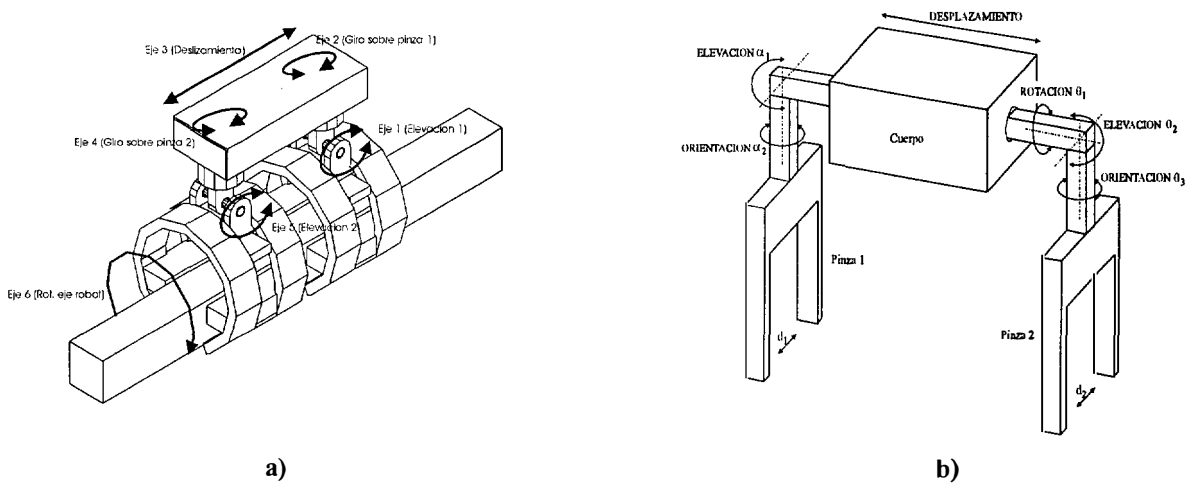


Figura 4.9 Configuraciones elegidas: a)Robot con aros, b)Robot con pinzas

Otra razón importante sobre la elección de estas dos cinemáticas es el número de g.d.l. necesarios para moverse. Estos dos diseños tienen el número mínimo de g.d.l. necesario con el que se puedan cumplir los requisitos del proyecto. Los demás tienen más g.d.l. con lo que se haría mucho más complejo el control necesario.

En una primera fase de diseño se consideraron dos opciones a la hora de elegir cuál sería la mejor disposición de los grados de libertad: robot con aros (figura 4.9a)), robot con un grado de libertad adicional en una de las pinzas (figura 4.9b)). En ambos casos hay el mismo número de grados de libertad

De las dos disposiciones se escogió la segunda por varias razones: el par que se produce entre la viga y el robot es mucho mayor en el primer diseño que en el segundo, puesto que la corona adicional hace que el cuerpo central esté mucho más separado de la columna. Segundo,

la construcción de los aros adicionales no es nada sencilla, deben ser de acero para que soporte pares muy altos, que junto con el tamaño que deben tener serían muy pesados. Tercero y último, la secuencia de paso del robot de una cara de la viga a otra es mucho más larga y más complicada que en el primer caso.

En el diseño elegido para su construcción, el robot presenta 8 grados de libertad, seis para posicionar cada una de las pinzas en cualquier parte de la estructura por la que se mueva el robot, y los otros dos, uno para cada pinza para que el robot se pueda agarrar bien a la estructura.

4.5.1 Secuencias distintas de movimiento del diseño elegido

Con el diseño cinemático elegido, se pueden alcanzar todos los puntos posibles de una estructura. Para analizar más detalladamente las posibles secuencias de movimiento que se pueden realizar, se diferenciaron tres clases distintas de movimiento:

- Movimientos a lo largo de una viga o una columna. (Movimientos en una dimensión)
- Movimientos en planos verticales u horizontales, a lo largo de las caras de dos vigas o dos columnas, o entre una viga y una columna. (Movimientos en dos dimensiones)
- Movimientos donde el robot cambia de un plano de la viga a otro. (Movimientos en tres dimensiones)

Cada uno de estos grupos se ha dividido, a su vez, en movimientos más elementales que se han llamado primitivas; y que son movimientos realizados por un solo eje cinemático.

En el movimiento a lo largo de una viga o una columna hay tres formas distintas de contemplarlo:

1. Movimiento como el de una oruga, en el que la secuencia de movimientos es el que se presenta en la figura 4.10:
 - a) Suelta de una de las pinzas
 - b) Extensión del cuerpo del robot
 - c) Agarre de la pinza sobre la viga

- d) Suelta de la otra pinza
- e) Recogida del cuerpo
- f) Agarre de la segunda pinza a la viga

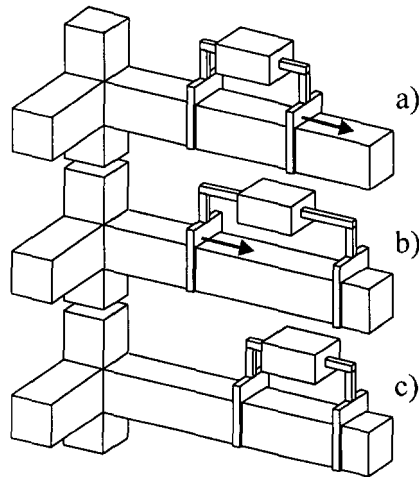


Figura 4.10 Desplazamiento sobre una viga

2. Rotación horizontal, con un giro a lo largo de un eje vertical, como se muestra en la figura 4.11:

- a) Suelta de una de las pinzas
- b) Pequeña elevación del robot sobre un eje horizontal
- c) Giro de 180° a lo largo de un eje vertical
- d) Pequeño descenso del robot sobre un eje horizontal
- e) Cierre de la pinza sobre la viga

3. Rotación vertical, como un acróbata, figura 4.11:

- a) Suelta de una de las pinzas
- b) Pequeña elevación del robot sobre un eje horizontal
- c) Giro de 180° a lo largo de un eje horizontal
- d) Pequeño descenso del robot sobre un eje horizontal
- e) Cierre de la pinza sobre la viga

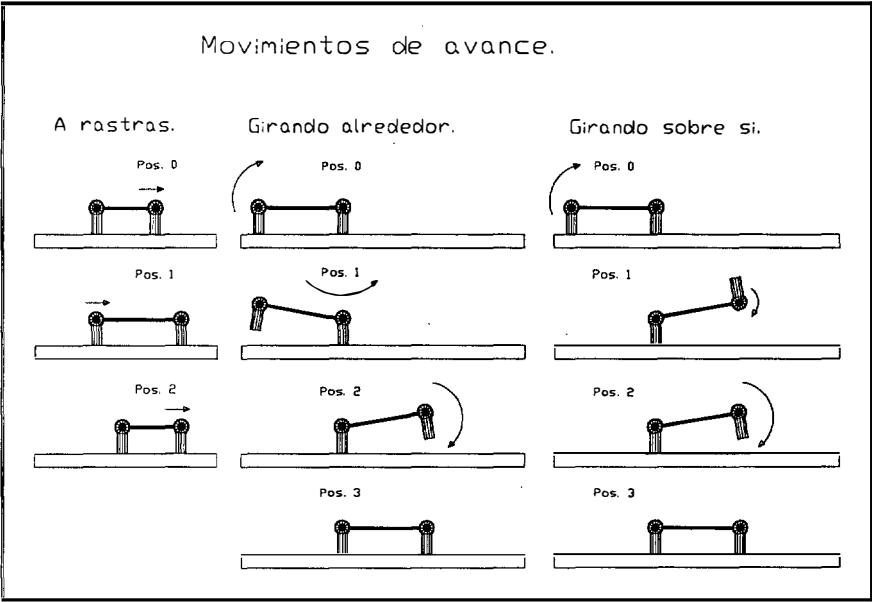


Figura 4.11 Desplazamientos sobre una viga

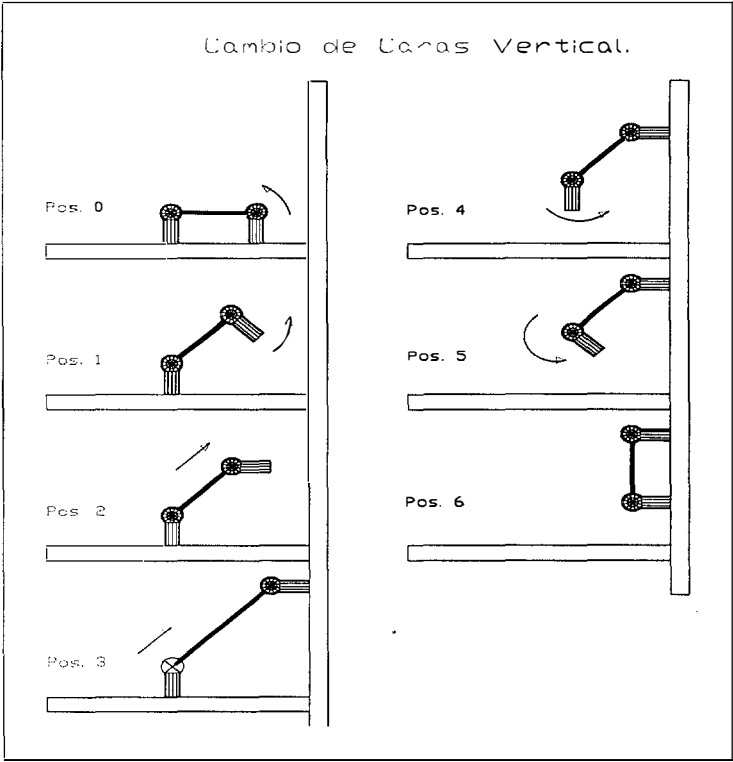


Figura 4.12 Cambio de una viga a una columna

En los movimientos en dos dimensiones entre dos vigas o columnas, la secuencia es similar a las anteriores añadiendo la elevación y la orientación, si es necesario en alguna de las

pinzas, figura 4.11 y 4.12. Finalmente, los movimientos más complejos en tres dimensiones se aseguran con la combinación de todos los movimientos individuales incluyendo la rotación de una de las pinzas. Los cambios dentro de la cara de una misma viga, tal y como aparece en la figura 4.13, se pueden hacer por el grado de libertad adicional que hay en una de las pinzas, en el caso del primer modelo. En el segundo, este cambio se consigue haciendo girar el cuerpo del robot por la corona que rodea a cada una de las pinzas. De todos los movimientos posibles entre los que se pueden hacer se han elegido los que tienen un consumo mínimo de energía. El estudio de dicho consumo no está enmarcado en el estudio de esta tesis; si se quiere profundizar en las razones que han llevado a la elección de unos o otros, se puede consultar en Balaguer, [Balaguer, 99a].

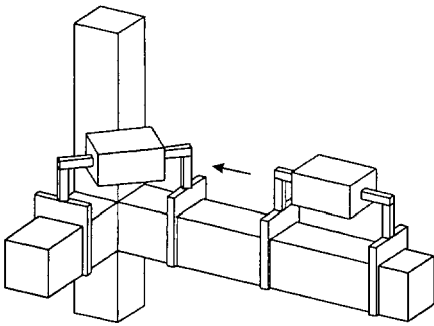


Figura 4.13 Desplazamiento en dos dimensiones

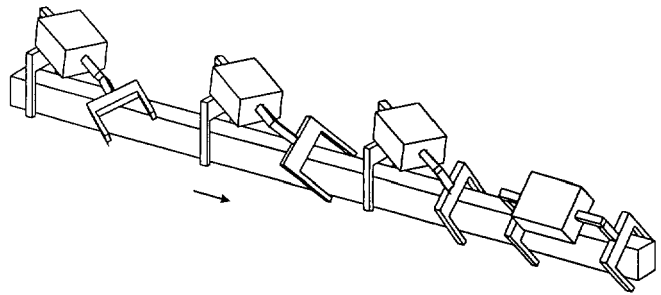


Figura 4.14 Desplazamiento en tres dimensiones

4.6 Descripción cinemática

De los 6 grados que posee el robot para desplazarse 5 son rotacionales y uno prismático. Posee el número mínimo necesario de grados de libertad para poder alcanzar cualquier lugar de la viga, e incluso cualquiera de sus caras. Si el robot tuviese un grado de libertad menos, no podría recorrer todas las caras de la estructura, con lo que no se podría inspeccionar todas las caras, con lo que no se cumpliría una de las especificaciones del proyecto ROMA.

La estructura cinemática del robot tiene dos soluciones, puesto que no es un robot que tenga una base fija, como el resto de los robots tradicionales, y por su forma se le puede aplicar

la cinemática directa como a cualquier otro robot manipulador. El robot ROMA tiene dos cinemáticas directas y dos cinemáticas inversas: la base está en la pinza que está sujeta a la estructura y el punto final es el de la pinza que está libre durante el movimiento.

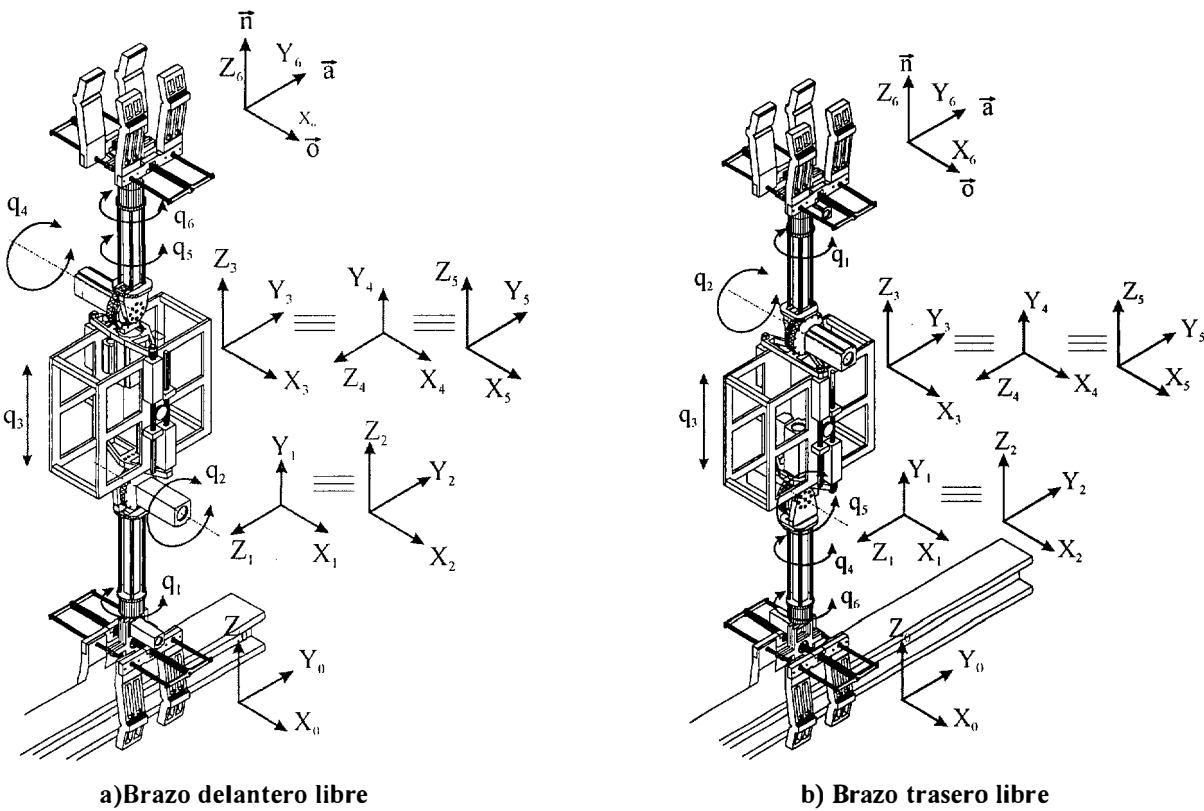


Figura 4.15 Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot ROMA

Se hace una distribución de los ejes y cuál es su disposición y calculamos para la opción 1 y 2 los parámetros de Denavit-Hartenberg para calcular las cinemáticas. En ambos casos la disposición para calcular los parámetros es con el robot totalmente extendido y con la pinza mirando hacia el frente.

Opción 1: Con la pinza del grado de libertad adicional suelta (brazo delantero libre).
Los parámetros de Denavit-Hartenberg son:

Para la figura 4.15 los parámetros de Denavit son los que aparecen en la tabla 4.3. Si se coge la segunda configuración, cambiaría el orden de las filas 4 y 2.

EJE	VARIABLE			
	θ_i	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i
1	θ_1	621	0	90°
2	θ_2	0	0	-90°
3	0°	q_3	0	0°
4	θ_4	0	0	90°
5	θ_5	0	0	-90°
6	θ_6	621	0	0°

Tabla 4.3 Parámetros de Denavit-Hartenberg

A partir de los parámetros de Denavit-Hartenberg [Denavit, 55] y desarrollando las matrices de transformación homogéneas [Paul, 82] se llega a la obtención de las ecuaciones de la cinemática directa. La relación entre dos sistemas sucesivos ($n-1$ y n) se establecen mediante una matriz de transformación homogénea, que contiene el producto de dos giros y dos traslaciones, que se llama matriz **A** [Paul 81] para articulaciones rotacionales:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Y para la articulación prismática la matriz resultante es:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Así que la matriz homogénea que **T_i**, que indica el posicionamiento (orientación y posición) del sistema de coordenadas i -ésimo respecto de la base del robot, sistema de coordenadas XYZ₀, se obtiene multiplicando las matrices ${}^{i-1}A_i$ de forma sucesiva

${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i$ que en el caso del robot ROMA será:

$${}^0T_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

donde todas las matrices corresponden a una articulación rotacional, a excepción de la matriz ${}^2\mathbf{A}_3$ que es una articulación prismática. El vector \vec{p} contiene la posición del extremo del robot, que en este caso es el centro de la pinza que se encuentra libre, respecto de la mitad de la pinza que se queda fija a la estructura. Los vectores \vec{n} , \vec{o} , y \vec{a} representan la orientación del extremo del robot.

Para este caso la solución es, para el vector \vec{n} :

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\theta_6 \cdot (\cos\theta_5 \cdot (\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \sin\theta_5 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2) + \\ &\quad \sin\theta_6 \cdot (-\sin\theta_4 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_4) \\ n_y &= \cos\theta_6 \cdot (\cos\theta_5 \cdot (\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \sin\theta_5 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2) + \\ &\quad \sin\theta_6 \cdot (-\sin\theta_4 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_4) \\ n_z &= \cos\theta_6 \cdot (\cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \sin\theta_5 \cdot \cos\theta_2) - \sin\theta_6 \cdot \sin\theta_4 \cdot \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

en el vector \vec{o} :

$$\begin{aligned} o_x &= -\sin\theta_6 \cdot (\cos\theta_5 \cdot (\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \sin\theta_5 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2) \\ &\quad + \cos\theta_6 \cdot (\sin\theta_4 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_4) \\ o_y &= -\sin\theta_6 \cdot (\cos\theta_5 \cdot (\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \sin\theta_5 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2) \\ &\quad + \cos\theta_6 \cdot (-\sin\theta_4 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_4) \\ o_z &= -\sin\theta_6 \cdot (\cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \sin\theta_5 \cdot \cos\theta_2) - \cos\theta_6 \cdot \sin\theta_4 \cdot \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

para el vector \vec{a} es:

$$\begin{aligned} a_x &= -\sin\theta_5 \cdot (\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \\ a_y &= -\sin\theta_5 \cdot (\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \\ a_z &= -\sin\theta_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Para la posición, vector \vec{p} , es:

$$\begin{aligned} p_x &= 621 \cdot (-\sin\theta_5 \cdot (\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_5) \\ &\quad - q_3 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\ p_y &= 621 \cdot (-\sin\theta_5 \cdot (\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4) - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_5) \\ &\quad - q_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\ p_z &= 621 \cdot (-\sin\theta_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_4 + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5) + q_3 \cdot \cos\theta_2 + 621 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Para el cálculo de la cinemática inversa y conseguir en la resolución de este problema no encontrarse con términos no lineales difíciles de despejar, se ha utilizado el método del desacoplo cinemático; se ha considerado la posición del robot sin tener en cuenta los tres últimos grados de libertad, es decir, se ha considerado la posición del punto donde se cruzan los tres últimos giros del robot. La ecuación que relaciona este punto con la posición real del extremo del robot es:

$$\bar{P}_{muñeca} = \bar{P}_{real} - 621\bar{z} \quad (4.8)$$

Así se pueden obtener las primeras tres coordenadas con la matriz homogénea 0T_3 . Se premultiplica esta matriz por las inversas de las matrices de transformación de los diferentes sistemas de referencia con el fin de ir aislando las variables θ_1 , θ_2 y θ_3 . El cálculo de la inversa de la matriz homogénea es muy sencillo.

$$\begin{aligned} {}^0T_3 &= {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \\ \left[{}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \right] (\theta_1) &= \left[{}^1A_2 {}^2A_3 \right] (\theta_2, \theta_3) \end{aligned} \quad (4.9)$$

A un lado de la expresión queda una matriz dependiente de una de las variables, y al otro lado la otra matriz dependiente del resto de las variables. A partir de aquí se busca la solución para θ_1 , luego se repite el proceso para θ_2 y θ_3 .

Para las tres últimas ecuaciones se realiza el mismo proceso pero con las matrices de rotación de los tres últimos ejes, sin necesidad de usar el vector de posición.

$$\begin{aligned} {}^3R_6 &= {}^3R_4 {}^4R_5 {}^5R_6 \\ \left[{}^3R_4 {}^4R_5 {}^5R_6 \right] (\theta_4) &= \left[{}^4R_5 {}^5R_6 \right] (\theta_5, \theta_6) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Realizando los cálculos necesarios la solución de la cinemática inversa es:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arctg \frac{p_y - 621 \cdot a_y}{p_x - 621 \cdot a_x} \\ \theta_2 &= \arctg \frac{-(\cos \theta_1 \cdot p_x - 621 \cdot a_x) + \sin \theta_1 \cdot (p_y - 621 \cdot a_y)}{p_z - 621 \cdot a_z - 621} \\ \theta_3 &= \cos \theta_2 \cdot (p_z - 621 \cdot a_z - 621) - \sin \theta_2 \cdot (\cos \theta_1 \cdot (p_x - 621 \cdot a_x) + \sin \theta_1 \cdot (p_y - 621 \cdot a_y)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_4 &= \arctg \frac{-a_x \cdot \sin \theta_1 + a_y \cdot \cos \theta_1}{a_x \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + a_y \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + a_z \cdot \sin \theta_2} \\ \theta_5 &= \arccos(-a_x \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - a_y \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + a_z \cdot \cos \theta_2) \\ \theta_6 &= \arctg \frac{o_x \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - o_y \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + o_z \cdot \cos \theta_2}{-n_x \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - n_y \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + n_z \cdot \cos \theta_2}\end{aligned}\quad (4.11)$$

Debido a la disposición cinemática que posee el ROMA la cinemática directa y la inversa es la misma independientemente de la pinza que se tome como base, es decir la que está fija a la estructura. Las ecuaciones de la cinemática directa en ambas disposiciones son iguales, y lo mismo ocurre en el caso de la solución de la cinemática inversa.

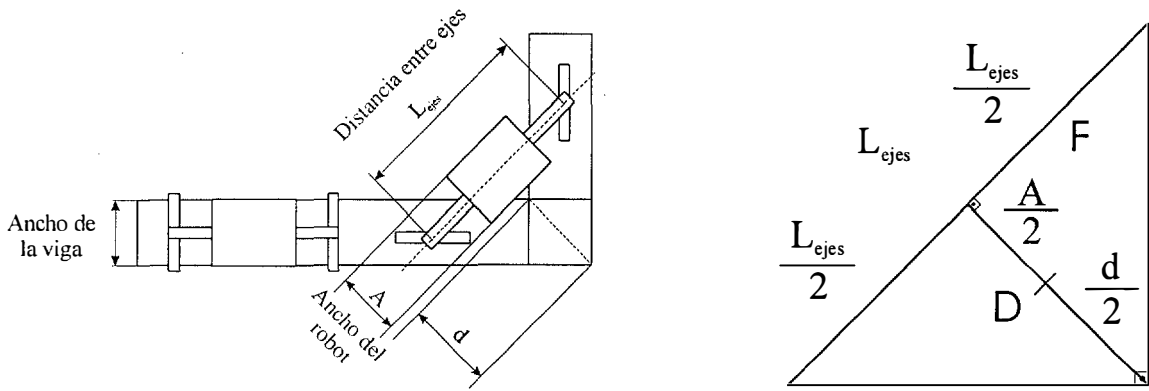


Figura 4.16 Parámetros que definen el ancho y longitud del robot en función del cambio de viga

Una vez decidida la cinemática más óptima para moverse en entornos tridimensionales, hay que tener en cuenta ciertos aspectos a la hora de decidir la dimensión de cada una de las partes del robot. La longitud y el ancho del robot son dos medidas que están relacionadas, ya que para una determinada longitud del robot, éste tendrá un ancho máximo que si se supera, el robot no podrá salvar el paso de una viga a otra. La figura 4.16 muestra la relación que hay entre las medidas de ancho y longitud del robot y el ancho de la viga, de donde se puede extraer el triángulo que aparece en la parte derecha de la misma figura. De esta figura se deduce que el cateto D tiene igual longitud que el cateto F.

Las ecuaciones que expresan la relación anterior indican el ancho máximo que puede tener el robot en función de la distancia entre ejes de elevación del robot.

$$\begin{aligned} diagonal \quad viga &\equiv d \sqrt{(ancho \quad viga)^2 + (ancho \quad viga)^2} \\ \frac{L_{ejes}}{2} &\equiv \frac{A}{2} + \frac{d}{2} \\ Ancho \quad máximo &= A_{max} = 2 \left(\frac{L_{ejes}}{2} - d \right) \end{aligned} \tag{4.12}$$

La tabla 4.4 muestra las anchuras máximas para distintas longitudes entre los dos ejes de elevación, que se cruzan con los de giro, y con la línea media de la viga. Para la viga se ha considerado la de máximo valor del epígrafe 4.2, es decir de 200 mm de alma. Como se puede apreciar claramente, si el robot es muy corto, el espacio que ocupará el cuerpo será muy reducido. Este espacio es él que debe contener todo el equipo de control necesario para el movimiento del robot, y las herramientas necesarias para las tareas de inspección y mantenimiento que se vayan a hacer.

Distancia entre ejes (mm)	250	300	400	500	600	700	800	900	1000
Ancho máximo (mm)	38	88	188	288	388	488	588	688	788

Tabla 4.4 Ancho máximo del robot en función de la distancia entre los ejes de elevación del robot

4.7 Cálculo dinámico. Descripción electromecánica del robot ROMA

Una vez decidida la composición cinemática más adecuada para alcanzar todos los puntos posibles a inspeccionar, el siguiente paso fue realizar un estudio del comportamiento dinámico del robot del que se obtuvieron diferentes datos: dimensiones de cada articulación, pares necesarios en cada una de ellas, que posteriormente llevará a la elección de las parejas motor-reductor y del peso total del conjunto.

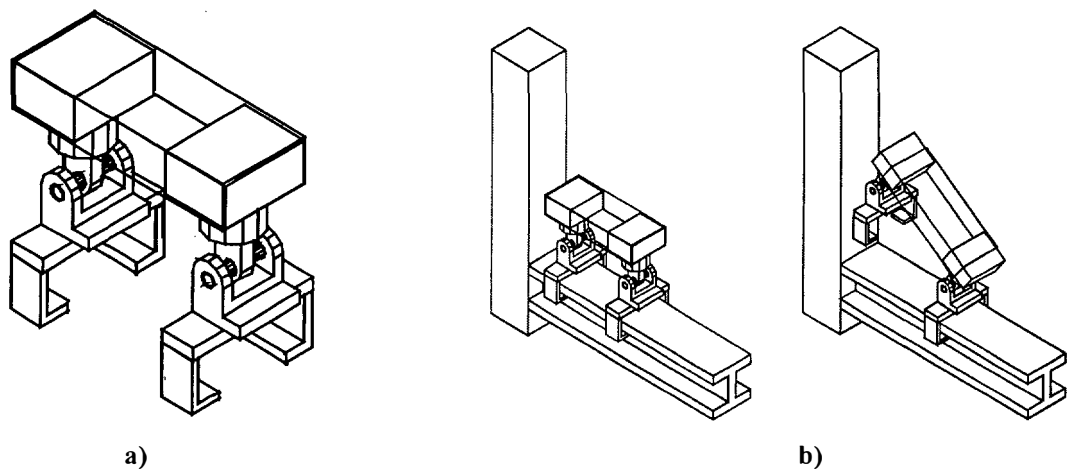


Figura 4.17 a) Modelo de robot usado en el simulador ADAMS b)Secuencia de movimiento

En la primera etapa se hizo un cálculo aproximado del peso general del robot y cuáles son sus dimensiones. Con estos datos se pudo escribir su modelo en la herramienta de simulación dinámica ADAMS. El prototipo definido está formado por sólidos de extrusión, figura 4.17a. Se simularon los movimientos que necesitan un mayor gasto de energía, obteniendo como resultado cuáles son los pares necesarios para poder realizar estos movimientos, figura 4.17b.

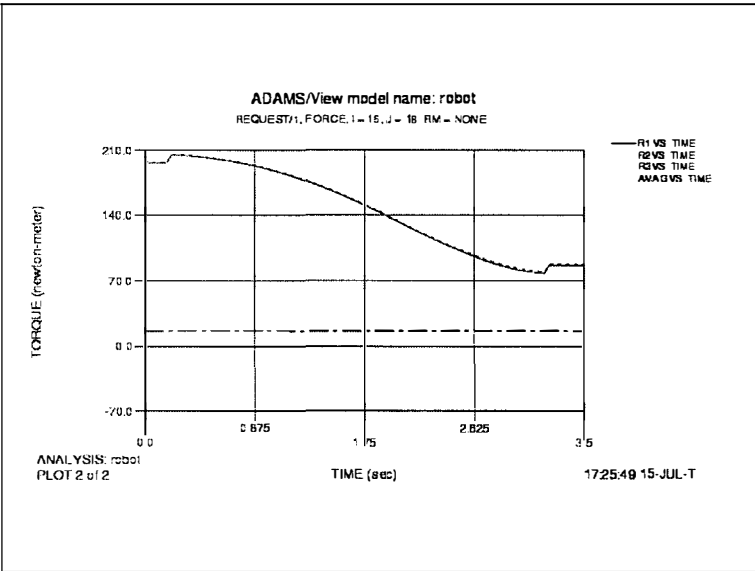


Figura 4.18 Curva de par en una elevación de 45°

Con una curva de pares como la que aparece en la figura 4.18, se buscaron los pares motor-reductor que con menor peso, son capaces de dar el par necesario para mover y sostener todo el robot. Se puede apreciar el par necesario en la articulación encargada de levantar el cuerpo y un brazo del robot; los pares en las direcciones X, Y, y Z y la magnitud total de las tres componentes. Se puede observar en la figura que la componente que realiza un mayor aporte a la magnitud total es la componente Z. Si no se encontrase ningún conjunto motor-reductor capaz de dar el par necesario requerido, habrá que volver rediseñar las dimensiones de la cinemática del robot y la colocación de sus grados de libertad. Este proceso se repite sucesivamente hasta encontrar la pareja que pueda dar el par calculado previamente.

Por tanto, hay un ciclo repetitivo en el diseño del robot que se ha tenido que realizar para poder ajustar las prestaciones dinámicas del robot, que es el siguiente:

- 1.- Estudio de peso y dimensiones del robot
- 2.- Cálculo del par necesario en cada una de las articulaciones
- 3.- ¿Hay motores adecuados que con el peso específico den ese par?
- 4.- Si los hay, se acabó el problema, si no hay que volver a elegir otros y volver a hacer el estudio dinámico

El peso total del robot depende del peso los motores y reductores, del peso de la estructura y de la electrónica necesaria. Normalmente, en una misma familia de motores, el par que proporcionan disminuye conforme se reduce su peso. Asimismo, si el peso de los motores es menor, también podrán aminorarse los pesos de los reductores, la electrónica asociada a los motores, y otros elementos del robot como puede ser su estructura mecánica, o sus pinzas de sujeción. La gráfica 4.19 relaciona el peso del robot estimado en función de 6 motores "AC Brushless" de la misma marca, numerados del 1 al 6 en orden creciente de su tamaño, y el par que proporcionan en el eje de elevación. Fijándose en la curva, se observa que la relación no es lineal. Se aprecia, que no por tener un motor de la serie más grande el par que se consigue va a ser mayor. Como se observa en la gráfica, los motores 2 y 3 dan un par mayor que el motor 4 con un peso total del robot menor.

El análisis anterior indica que no hay que descartar ningún actuador, a priori. Puede ser que un motor parezca más débil que uno con un par mayor, pero si su peso es menor, todos los elementos auxiliares que se necesitan a su alrededor son más pequeños, e incluso el peso de la estructura y elementos de sujeción pueden bajar, se puede conseguir que la relación par-peso de dicho robot sea mejor que la de otro diseño con un motor con mayor par.

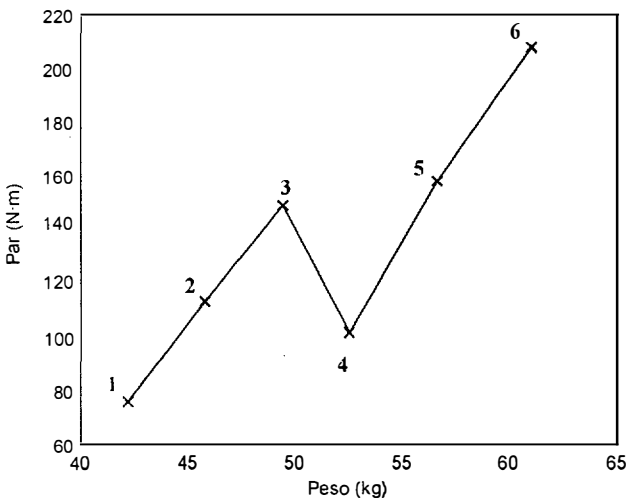


Figura 4.19 Par proporcionado por los motores de la familia Baldor en función del peso del robot

Con esta curva no basta para seleccionar los motores que se necesitan en el robot, hay que tener en cuenta también las dimensiones que tienen, ya que para cada diseño será distinto. Hay que tener en cuenta también la dimensión que tienen cada uno de los actuadores y comprobar si el resto de la electrónica asociada a los motores cabe en el espacio que hay en el cuerpo del robot.

Una vez acabado este proceso se llegó a la conclusión de que el robot debería tener una longitud de 1 m cuando esté totalmente encogido y 1.5 m extendido. La longitud de los brazos es de 621 mm. Estas distancias son suficientes para salvar las distintas transiciones entre vigas y columnas que pueden existir. Los conjuntos motor-reductor son capaces de soportar los pares que se generan en las diferentes articulaciones con estas medidas, consiguiendo una buena relación par/peso en cada una de las articulaciones.

Como se ha dicho anteriormente, todos los cálculos dinámicos relacionados con el diseño del robot se han hecho con la ayuda del simulador dinámico ADAMS, en la Universidad Carlos III de Madrid, mientras que los planos y la fabricación final del robot se encargó a la empresa APTECA S.A.

El robot se puede dividir en tres partes bien diferenciadas:

- El cuerpo del robot, que incluye la CPU, una tarjeta controladora de ejes, un servoamplificador, la tarjeta de comunicación radio con el ordenador de la base, tres tarjetas de multiplexación y electrónica auxiliar.
- El sistema de locomoción de 8 grados de libertad accionados por medio de motores síncronos de imanes permanentes de campo alternativo, "*AC brushless*", con sus adecuados reductores, que permiten al robot realizar movimientos tridimensionales en el entorno especificado en el epígrafe 4.2.
- Una plataforma sensorial que posee una cámara y un telémetro láser, que se usa en tareas de movimiento y de inspección.

Los motores elegidos para cada uno de los grados de libertad son de la marca Baldor Electric, de cuatro rangos distintos: 3 de 0.4 N·m, 2 de 1.4 N·m, 1 de 0.7 N·m, y 2 de 2 N·m. En la tabla 4.5 sólo aparecen las características técnicas más importantes de los motores elegidos, que serán muy útiles para un posterior control sobre ellos, en orden creciente de par generado y peso.

MOTOR	BSM50A-175	BSM50A-275	BSM63A-250	BSM63A-375
Corr. Nominal (A)	0.69	1.4	3.3	3.0
Par Nominal (N·m)	0.45	0.91	1.47	2.09
Cte de par (N·m/A)	0.75	0.75	0.48	0.71
Velocidad máx. (r.p.m.)	4000	4000	7000	7000
Peso (kg)	1.6	1.85	3.1	3.5

Tabla 4.5 Propiedades características de los motores

Se han escogido estos motores porque son los que tienen una relación par/peso más alta de los que existen en el mercado. Esta clase de motores no se ha usado demasiado en robótica

debido a lo complicado que es controlar su movimiento. Actualmente, con las nuevas técnicas de control digital se han podido desarrollar los equipos electrónicos adecuados para controlar su movimiento. Es preciso indicar que los motores paso a paso también tienen una relación par/peso muy elevada, en determinados caso mayor a los *AC brushless*, pero a regímenes de velocidad muy bajas. De los motores más pequeños, dos mueven las pinzas y el tercero la cuarta articulación, que es la extensión del cuerpo; el mediano es el encargado de mover la quinta articulación, los g.d.l. primero y sexto se mueven por dos motores BSM63A-250, y las articulaciones segunda y quinta por los motores más grandes.

Ninguno de los motores acciona directamente ninguna de las articulaciones, tienen conectado un mecanismo de transmisión; cinco transmiten el movimiento gracias a un Harmonic-Drive y tres por medio de una primera etapa de engranajes y una segunda de piñon y cremallera. Todos tienen en común su alto valor de reducción, tanto los H-D como los mecanismos de engranaje. En la siguiente tabla se muestran las relaciones de reducción de cada uno de ellos.

REDUCTOR	HDUC-234234	HDUC-234	Transmisión de las pinzas	Transmisión de la extensión
Reducción	1/160	1/125	1/180	1/180
Resolución	1'	1'	0.3 mm	0.3 mm
Peso	3.1 kg	2.1 kg	2.1 kg	3 kg

Tabla 4.6 Características principales de los reductores

En todos los reductores hay una gran relación de reducción con el fin de aumentar el par de cada uno de los ejes, y de disminuir la velocidad de los ejes para rebajar los esfuerzos dinámicos.

La estructura del robot se ha hecho con planchas y perfiles de aluminio para reducir el peso del robot. El cuerpo del robot está formado por dos planchas taladradas de aluminio, unidas por 8 perfiles de aluminio. En el espacio formado, se encuentra el ordenador central del robot, dos motores junto con sus respectivas transmisiones, y dos cajas que contienen la electrónica

auxiliar necesaria para el buen funcionamiento del robot. En la parte superior del cuerpo está situada la plataforma sensorial, compuesta por una cámara y un telémetro láser. El robot podría llevar cualquier otro instrumento para realizar cualquier otra operación en la zona a inspeccionar, siempre y cuando no pese mucho y no sea muy voluminoso.

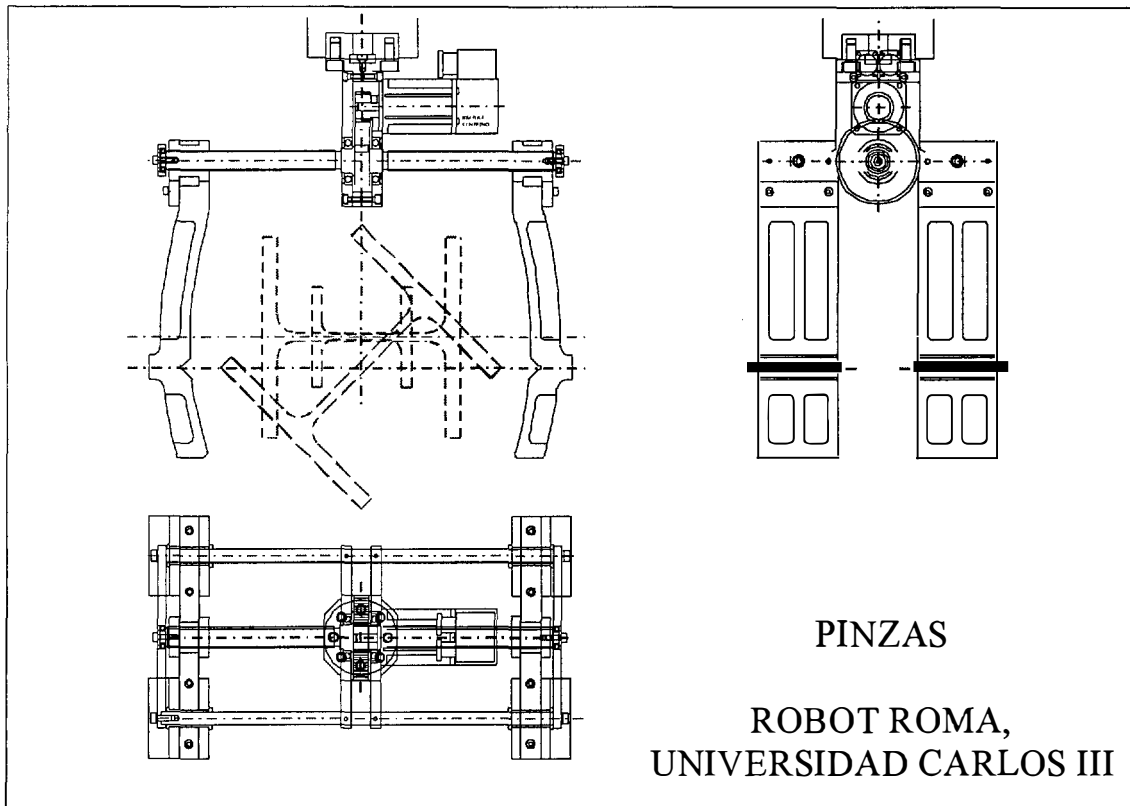


Figura 4.20 Detalle de las pinzas del robot ROMA

Los elementos principales de la estructura, sobre los que recaen los mayores esfuerzos estáticos y dinámicos, son de acero. La razón estriba en que el aluminio no es capaz de soportar tensiones tan altas. Tal es el caso de las transmisiones de las dos pinzas, por medio de husillos, y la transmisión de la articulación de traslación, a través de engranajes y guías dentadas de acero. Se ha procurado que, en la medida de lo posible, sean los reductores o los motores, los elementos estructurales de unión entre una parte y otra de la máquina. Las dos pinzas tienen cuatro dedos cada una, dos a cada lado, figura 4.20. Cada uno de ellos tiene la superficie labrada

para reducir peso, un saliente en la parte superior, y dos guías en la parte inferior que ayudan a sujetar al robot a perfiles de doble T de diferentes dimensiones.

4.8 Análisis de las fuerzas que se producen en la escalada.

El requisito más importante sobre el movimiento de un robot escalador es que se sostenga de forma segura sobre la superficie de actuación. Hay muchos factores que afectan a la sustentación del vehículo y que deben tomarse en cuenta en la etapa de diseño del robot. La capacidad de agarre del mecanismo de sujeción, la ubicación de sus puntos de apoyo, y su distribución de masas son algunos de ellos.

Al igual que en muchos robots caminantes, el movimiento de un robot escalador es el resultado de aplicar un conjunto de fuerzas sobre la superficie de soporte a través de las patas en apoyo. La determinación de las fuerzas que se aplican para llevar a cabo una tarea se conoce como “el problema de distribución de fuerzas”.

En un robot escalador las fuerzas de interacción robot-superficie de escalado, y las fuerzas que sobre él actúan, tienen que estar en equilibrio, a fin de evitar tanto la caída como el deslizamiento. Dichas fuerzas son:

- Fuerzas de actuación externas
- Fuerzas de reacción aplicadas por la superficie
- Fuerzas de fricción de las superficies
- Fuerzas de agarre (que en este caso son de compresión).

En la figura 4.21 se pueden observar las distintas fuerzas que actúan en el agarre del robot a una superficie vertical. Para el estudio de las fuerzas se ha establecido un sistema de referencia del cuerpo X-Y-Z, con el eje X alineado con el eje transversal del robot, el eje Z alineado con el eje longitudinal y el eje Y perpendicular al plano X-Z y en sentido tal que se

forme un triedro ortonormal a derechas. El origen del sistema se coloca en el centro de gravedad del cuerpo.

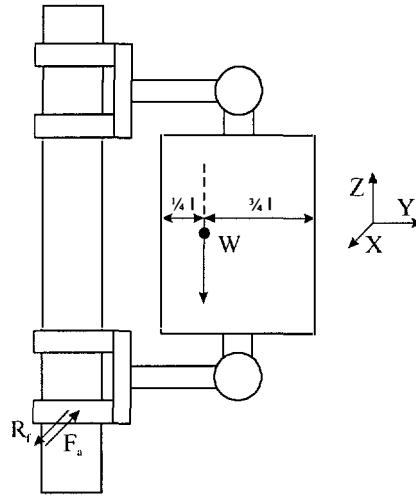


Figura 4.21 Robot sujeto a una columna

Sea n el número de pinzas de agarre del robot; x_i, y_i, z_i ($i=1,2$) las coordenadas de las pinzas 1, 2, considerando que agarran en el centro geométrico de cada una de ellas. También se considera que el cuerpo del robot es paralelo a la superficie de escalado.

M_e y F_e , los momentos y fuerzas externos, aplicados sobre el robot y concentradas en el origen del sistema de coordenadas del cuerpo; tensión de los cables (alimentación, seguridad,...), la fuerza del viento, etc.

W , el peso del vehículo (incluyendo cuerpo y pinzas) concentrado en el centro de gravedad del mismo que se considera que está en la parte baja del cuerpo.

Rf_i , $i=(1,2)$, la magnitud de las fuerzas perpendiculares de reacción de la superficie en cada pinza con la superficie y durante el agarre de cada una.

F_a , la fuerza de sujeción, que se considera igual en cada pinza y se considera que actúa en un punto de ella.

F_{fz} y F_{fx} (si no estuviese bien alineado) las magnitudes de las fuerzas tangenciales de reacción de la superficie de la pinza 1, 2.

Según estas consideraciones se tiene que para cada pinza, para que el robot no deslice durante la fase de apoyo debe cumplirse la siguiente restricción:

$$\sqrt{F_{fz1}^2 + F_{fx1}^2} \leq \mu R_{f1} \text{ pero como } F_{fx1} \approx 0$$

$$F_{fz1} \leq \mu R_{f1}$$

y para la pinza 2:

$$\sqrt{F_{fz2}^2 + F_{fx2}^2} \leq \mu R_{f2} \text{ pero como } F_{fx2} \approx 0$$

$$F_{fz2} \leq \mu R_{f2}$$

μ es el coeficiente de fricción estático de la superficie de escalado. Las ecuaciones que gobiernan el equilibrio del robot se pueden clasificar en dos grupos, de acuerdo al efecto que produce su no cumplimiento, sobre la seguridad del robot en la estructura, su caída o el deslizamiento del mismo.

4.8.1 Condiciones de prevención de caída

Su cumplimiento garantiza que el robot va a permanecer unido a la superficie de escalado y a la vez impone restricciones a los valores máximos a las fuerzas de contacto –entre las pinzas y la superficie- Las ecuaciones son:

$$F_{ey} + W_y + \sum_{i=1}^n (R_{fi} - \alpha_i F_{ai}) = 0$$

$$M_{ex} + \sum_{i=1}^n z_i (R_{fi} - \alpha_i F_{ai}) + \sum_{i=1}^n h F_{fzi} = 0$$

$$M_{ez} - \sum_{i=1}^n x_i (R_{fi} - \alpha_i F_{ai}) + \sum_{i=1}^n h F_{fxi} = 0$$

en donde h es la (altura) distancia proyectada en el eje y del cuerpo respecto al plano que contiene los puntos de sujeción, y la variable lógica α_i vale 1 si la pinza está agarrándose a la estructura y 0 si no lo hace.

$$\begin{cases} h \geq 0 \\ \alpha_i = 1 & \text{Pinza agarrando} \\ \alpha_i = 0 & \text{Pinza sin agarrar} \end{cases}$$

4.8.2 Ecuaciones de prevención del deslizamiento

Son las ecuaciones que agrupan los posibles desequilibrios de fuerzas que causarían el descenso del robot por deslizamiento sobre la superficie, aunque el robot se mantuviese unido a la misma. Las ecuaciones son:

$$F_{ex} + W_x + \sum_{i=1}^n F_{fxi} = 0$$

$$F_{ez} + W_z + \sum_{i=1}^n F_{fzi} = 0$$

$$M_{ey} - \sum_{i=1}^n (x_i F_{fzi} - z_i F_{fxi}) \alpha_i = 0$$

Donde α_i indica si la pinza determinada está agarrando o no.

En el caso especial de agarre con una sola pinza, hay dos puntos de contacto ya que el robot se echa para atrás, debido a la deformación producida en material de la pinza sujeta.

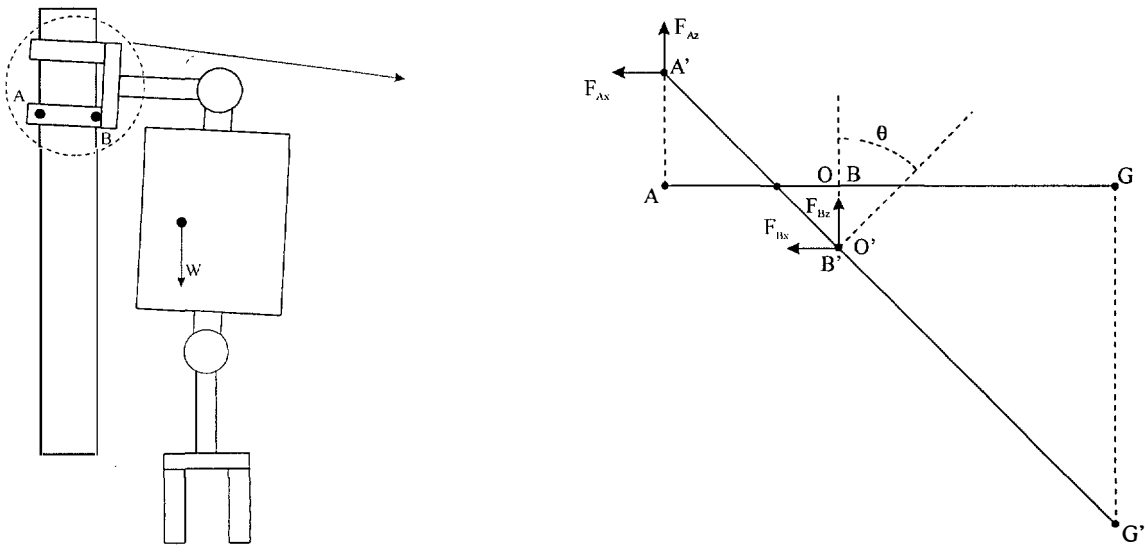


Figura 4.22 Robot sujeto con una sola pinza. Esquema de fuerzas

Las ecuaciones son:

$$AB = L_1 \quad BO = 0$$

$$OC = 0 \quad OG = L$$

$$AA' = L_A \quad BB' = L_B$$

$$F_{Bx} - F_{Ax} = 0$$

$$F_{Az} - F_{Bz} - W = 0$$

$$F_{Ax}[L_1 \sin \theta] - F_{Az}[L_1 \cos \theta] - WL \cos \theta = 0$$

En este caso el robot no se agarra por la fuerza de compresión. El cuerpo inclina la base del robot, y la pinza que está agarrando, con lo que el robot toca en dos puntos a la columna, tal y como se muestra en la figura 4.22. De esta forma, el robot se sujeta por los dos esfuerzos que se provocan en esos dos puntos opuestos de contacto, que también ayudan al agarre del robot.

4.9 Arquitectura hardware

Otro aspecto importante del diseño del robot, junto con el cinemático, y equiparable al mecánico, es su diseño eléctrico y electrónico. Hay que tener en cuenta que en las especificaciones del robot ROMA se consideró que tuviese una autonomía total; es decir, que no necesitara la conexión un "cordón umbilical" que le proveyera de energía para poder realizar sus movimientos, y que fuese capaz de decidir el sólo, ciertos movimientos por la estructura, sin necesidad de estar controlados continuamente por el operador desde la base.

Por tanto, el robot tiene que tener un diseño eléctrico y electrónico específico para poder conseguir las metas anteriores, teniendo siempre en cuenta que el peso sea mínimo. Todos los estudios realizados en el esquema hardware pueden ser extrapolados a otros robots escaladores, aunque sus accionadores no sean eléctricos.

En el siguiente epígrafe se va a hacer una descripción de todos los componentes que forman parte del sistema electrónico, y su relación con el eléctrico; cuál es la estructura del

ordenador central, cuál es el esquema general de conexión de un control de posición de un motor, y la que se ha adoptado posteriormente en el robot ROMA. Posteriormente se explican las características principales de cada uno de los elementos que forman parte de este esquema, a excepción del motor que ya se ha visto en el apartado anterior. Por último se realiza una breve descripción de la plataforma sensorial.

4.9.1 Ordenador central del robot

El ordenador central del robot es un PC industrial con una placa base de reducido tamaño, que contiene un procesador Intel 486, y dos puertos serie. En el *rack* industrial en el que se aloja la placa principal, también se encuentra conectada una tarjeta digitalizadora para la adquisición de imágenes, una tarjeta de red Ethernet-radio, que permite la comunicación, vía radio, con el ordenador de tierra en el que se encuentra el operador. Por último, en el *rack* se ha colocado también una tarjeta controladora de ejes, y una tarjeta de memoria RAM que permite el acceso desde el procesador principal, CPU, y desde el procesador, DSP de la tarjeta de control de ejes. De estas tarjetas se hablará más adelante con más detalle.

4.9.2 Control de posición de un motor. Esquema básico

El esquema normal de conexión para el control de posición de un motor es el que aparece en la figura 4.23; compuesto por un controlador, un amplificador, y un sensor de posición que proporciona la señal al controlador para que se pueda cerrar el bucle. En el caso concreto del robot ROMA, el controlador es el ordenador central del robot; gracias a la tarjeta de control de ejes. Esta tarjeta está conectada al amplificador con dos grupos de señales de control, uno para habilitar o deshabilitar el movimiento de los motores, señales digitales, y otro para enviar la señal de referencia que hay a la salida del regulador, señales analógicas; en total suman seis señales. El amplificador recibe la tensión de referencia y la convierte en tensiones de excitación trifásicas conmutadas a alta frecuencia, que se aplican en los devanados del motor. En cada motor se dispone de un resolver para proporcionar la información de posición rotórica necesaria para poder generar una correcta corriente de excitación de cada una de las fases. El

amplificador convierte la señal de resolver a encoder y lo envía a la tarjeta controladora de ejes para que pueda realizar su control PID de posición del motor. Estos dos tipos de señales necesitan 6 cables cada uno.

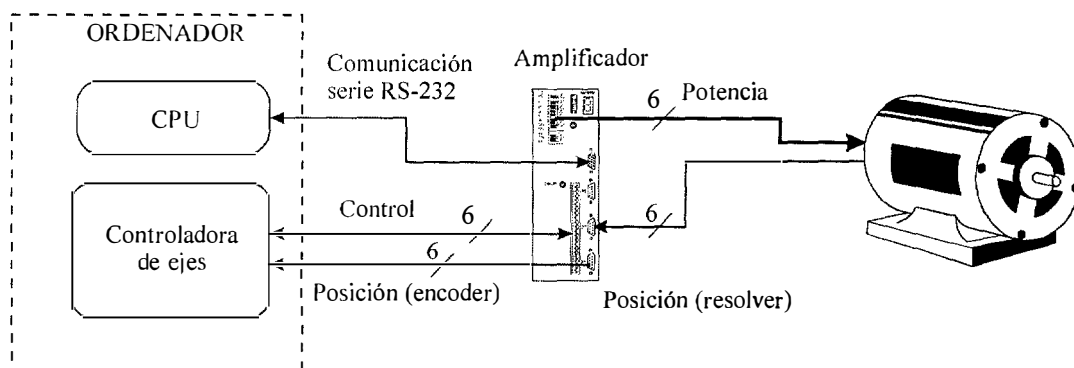


Figura 4.23 Esquema hardware básico de conexión de un motor

4.9.3 Esquema hardware del robot ROMA

El esquema visto en el epígrafe anterior es el que normalmente se construye para controlar cada una de las articulaciones. Con un robot de ocho grados de libertad, el único elemento que no se repite es el ordenador central, ya que es capaz de controlar varios ejes a la vez. Gracias a un mecanismo de transmisión adecuado se podría conseguir que un solo motor moviese dos o más articulaciones, pero un motor siempre llevaría asociado un amplificador. Un robot con ocho motores debería llevar ocho amplificadores. Si se aplicase esto mismo en el robot ROMA resultaría un número muy elevado de amplificadores para los que no habría materialmente espacio en el robot donde colocarlos; todos juntos no cabrían en el cuerpo central del robot. Otras razones más importantes para no usar tantos amplificadores son el excesivo peso que supondrían y el mayor consumo energético que habría con los ocho trabajando al mismo tiempo.

Por tanto, se hace necesario la reducción de su número al mínimo; se usa un solo accionador para mover los ocho motores, teniendo en cuenta que esto redundara en una menor velocidad en la realización de una secuencia completa en el movimiento del robot. Dicha decisión conlleva también la necesidad de multiplexar las señales de control del ordenador al

amplificador, las de potencia del amplificador al motor, las de posición (resolver) del motor al amplificador, y las de posición (encoder) del amplificador al ordenador. La arquitectura final que tiene el robot es la que viene representada en la figura 4.24. En ella se pueden ver que las señales que están multiplexadas, son las que tienen alguna relación con él.

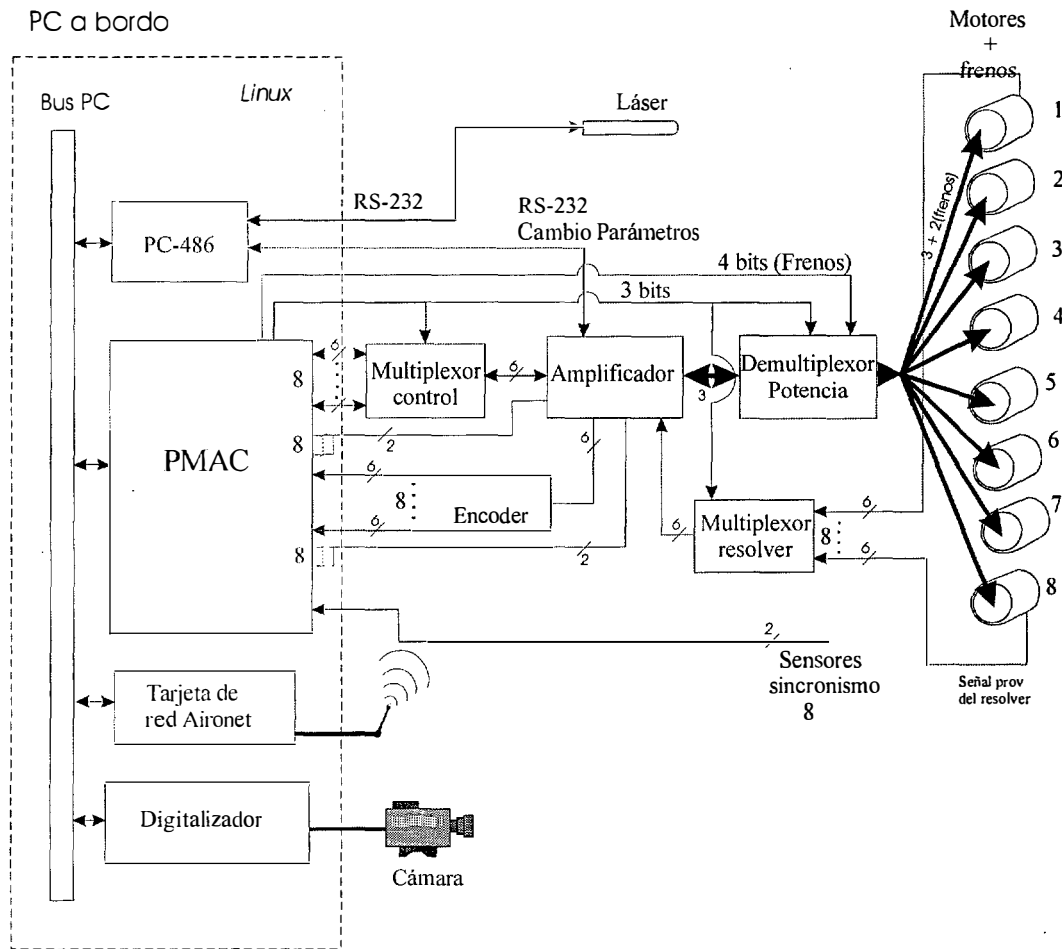


Figura 4.24 Esquema general hardware del robot ROMA

4.9.4 Amplificador

El amplificador, DBSC 105, de la firma Baldor Electric, es el encargado de generar la señal de potencia adecuada para mover los ocho motores del robot. El accionador elegido tiene la capacidad suficiente para controlar los cuatro tipos distintos de motores que hay en el robot. Simplemente necesita conocer es cuál es el que va a mover en cada momento.

El amplificador realiza un control vectorial, por lo que necesita conocer en cada instante la posición del rotor, y cuáles son los parámetros eléctricos y mecánicos principales del motor que va a mover. Estos datos están almacenados en una EEPROM interna, que lee cuando calcula el regulador de corriente más adecuado para ese motor en concreto. De esta manera se consigue una buena eficiencia en el movimiento del motor.

El amplificador puede medir distintos valores relacionados con el movimiento del motor tales como: velocidad, posición, corrientes de cada fase del motor, etc.. Todos estos datos se leen a través de una conexión mediante una línea serie RS-232 con el amplificador. Por este mismo canal se pueden mandar órdenes al amplificador, y de entre todas las posibles, la más importante es el cambio de parámetros del motor que se va a mover en cada instante; ya se comentó anteriormente que el robot tiene 4 tipos distintos de motores. Se tarda una media de 15 segundos en almacenar los datos en la EEPROM del amplificador y en calcular el regulador de corriente. Si hay que mover varios motores, es bueno mover los de una misma clase seguidos uno de otro, realizando las mínimas transiciones posibles de una familia a otra, con lo que se rebaja el tiempo total de transferencia de parámetros, y en consecuencia aumenta la velocidad del robot en un movimiento complejo.

El modo básico de control con el que trabaja el amplificador es el modo de corriente [Baldor, 95a]. La corriente inyectada en el bobinado del motor, que es equivalente al par producido en su eje, es proporcional a la señal referencia analógica que se envía al amplificador desde la tarjeta de control de ejes. Un voltaje de $\pm 10V$ es equivalente a la corriente de pico especificada para cada tipo de motor. El control de velocidad y posición del motor se cierra en un bucle externo al accionador, gracias a la tarjeta controladora de ejes. De esta forma, hay tres bucles de regulación en el movimiento del motor: corriente, velocidad, y posición. El único que se cierra en el amplificador es el de corriente.

Los coeficientes del controlador de corriente se determinan automáticamente por el amplificador en función de las especificaciones del motor seleccionado. De este modo, el bucle de corriente es específico para cada combinación de motor-amplificador. El controlador

de corriente, que tiene una estructura polinomial, está equipado con un algoritmo *anti-windup* que protege el bucle de control de sobreoscilamiento y situaciones inestables en el caso de saturación en la señal de salida de generador PWM (*Pulse Width Modulation*). Los parámetros que necesita conocer son los siguientes:

- Ancho de banda (fijo a 1000 Hz)
- Coeficiente de avance de fase de la señal de referencia respecto de la posición del rotor.
- Corriente de pico del motor.
- Corriente nominal del motor.

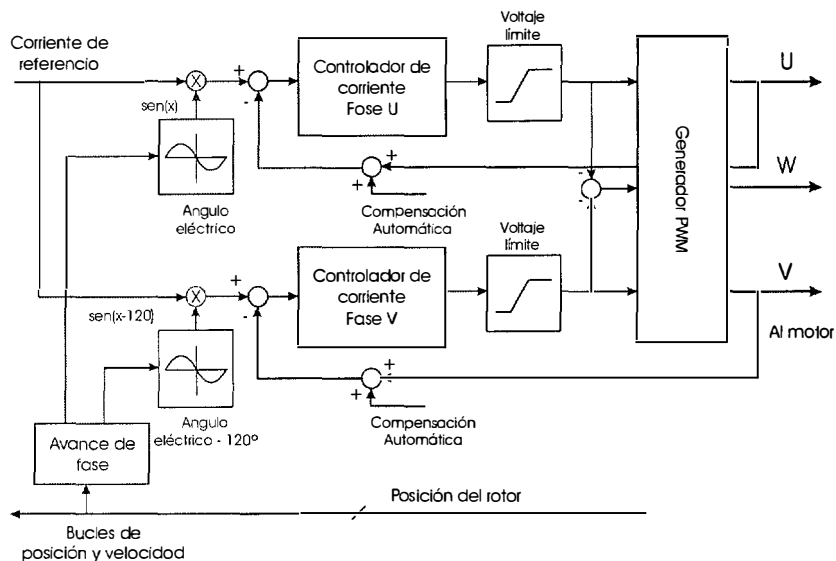


Figura 4.25 Bucle de regulación del amplificador

El esquema de la figura 4.25 muestra el regulador de corriente que posee el accionador. En él aparecen tres bloques significativos: Avance de fase, Controlador de corriente, y Generador PWM.

4.9.5 Tarjetas multiplexoras

Como se puede observar en la figura 4.24 donde aparece el esquema eléctrico implementado en el robot ROMA, es necesario multiplexar las señales de potencia:

- salidas de tensión del amplificador al motor

- desbloqueo de frenos,
- y las señales de control:
- de la tarjeta de control de ejes al amplificador
 - de los resolvers al amplificador.

La selección de las señales de potencia se hace con una tarjeta cuyo elemento principal es un multiplexor que activa distintos relés mecánicos que son los únicos que permiten la operación de cambio con éxito. Los relés de estado sólido, aunque son más modernos, están basados en TRIACS, por lo que tienen una limitación en cuanto a su frecuencia de trabajo, de 50 a 400 Hz, frecuencia muy baja para la que proporciona el amplificador en esta señal, con lo que la calidad del movimiento del motor empeora considerablemente. Los relés mecánicos una vez cerrados no cambian en nada la forma de la señal de potencia. Por último, el multiplexado de las señales de las señales de desbloqueo de los frenos no supone ninguna dificultad.

En cambio, la multiplexación de las señales de control no es tan sencilla; los resolvers tienen 6 señales senoidales de 17 V de amplitud y una frecuencia de 7.5 kHz que se seleccionan con multiplexores analógicos. Con las señales de control, analógicas y digitales, que van desde la tarjeta de control de ejes al amplificador, se adoptó la misma solución con objeto de dar una mayor uniformidad a los diseños realizados, aunque en este caso la solución pudiese ser más sencilla. Para más información sobre este aspecto se puede consultar [Jardón, 98].

4.9.6 Tarjeta de control de ejes

La tarjeta de control de ejes PMAC [Baldor, 95b] de la firma estadounidense Baldor-Deltatau Systems es la parte central donde se cierra el bucle de control del robot en tiempo real. Posee un procesador digital de señales DSP 56001 de Motorola que le confiere una alta capacidad de procesamiento. Puede dirigir el movimiento de ocho ejes de forma coordinada, aunque en el robot ROMA solo mueve un motor en cada instante, pudiendo elegir entre una gran variedad en el control de sus trayectorias, y cambiar durante su ejecución, las diferentes variables que afectan a la posición, velocidad, y aceleración de cada uno de los ejes. La tarjeta

forma un sistema completo de control de ejes con capacidad de programación con su lenguaje propio.

La tarjeta PMAC también incluye una EEPROM que contiene ocho reguladores de control diseñados especialmente para el control de ejes. Cada uno de ellos posee un bucle de realimentación de posición y velocidad, así como un lazo de prealimentación capaz de disminuir los errores de posición y compensar la fricción existente en el eje. Una de las principales características de la tarjeta es la posibilidad de cambio en tiempo real de los parámetros de control, es decir, las ganancias del regulador pueden ser modificadas durante el movimiento del eje, bien desde un programa interno de la tarjeta, o bien desde otro microprocesador conectado a ella. Esta cualidad permite la implantación de estrategias de control adaptativo en tiempo real. El DSP trabaja con un periodo de actualización que se sitúa entre 30 y 60 μs /eje y que puede ser modificado por el usuario.

Esta tarjeta dispone de convertidores digitales-analógicos que proporcionan una tensión entre +10V y -10V para cada uno de los ejes. Las salidas están multiplexadas en función del eje que se mueve en cada momento y conforman la entrada de referencia al amplificador.

La rápida comunicación entre la tarjeta controladora de ejes y la CPU central está garantizada por medio de:

- Una comunicación a través de un chip controlador de registros que permite la comunicación mediante las técnicas de *polling* o rutinas de interrupción
- Una memoria RAM de doble puerto (DPRAM) a la que hay acceso desde los dos microprocesadores que hay en el robot, el DSP y la CPU.

4.9.7 Captadores de posición

Cada uno de los ejes dispone de un resolver que está incluido en la carcasa del motor. Todos están conectados por una de las cajas multiplexoras al amplificador, para que éste pueda leer la posición y cerrar su bucle de corriente. En el amplificador se realiza otra tarea importante,

traducir la señal de resolver a un formato adecuado para la tarjeta de control de ejes; señal de encoder que es el único capaz de leer. Los sensores están colocados en el eje del motor, antes del de salida. Por tanto, para conocer la posición de cada eje, hay que tener en cuenta el grado de reducción que tiene en su correspondiente mecanismo de transmisión. Hay que tener en cuenta que los ratios son muy elevados en todos ellos.

Puesto que todos los encoders son incrementales en lugar de absolutos, se hace necesario sincronizar el robot nada más ponerlo en funcionamiento. Es decir, es preciso definir una posición de sincronismo o puesta a cero de los captadores a la que es preciso mover el robot antes de ejecutar cualquier movimiento.

4.9.8 Sistema sensorial

El robot puede llevar cualquier tipo de sensor que recoja información de la estructura o actúe sobre ella. Los equipos no deben ser muy pesados ni muy voluminosos para que no se modifique en gran medida las propiedades dinámicas del robot: su peso total incluido la carga que lleva, ni sus momentos de inercia, ni los pares de fuerzas que se crean en él. Actualmente, el robot lleva una cámara CCD para realizar inspecciones visuales y un telémetro láser que le ayuda a moverse y a localizarse sobre la estructura. Los equipos deben consumir poca energía, o llevar su propia fuente de energía, siempre que no pese demasiado. Tienen que tener tarjetas electrónicas adecuadas para que las herramientas se puedan manejar desde el ordenador, tanto para activarlos como para recoger información de ellas.

La cámara CCD está conectada a una tarjeta gráfica digitalizadora, que integrada en el ordenador del robot, trata la imagen para que se pueda enviar al computador de la base vía radio, donde el operario comprueba si el estado de la estructura es el correcto; sin grietas, ni roturas u otros defectos. Es una TM-4 de la firma PULNIX, con una resolución media de 500x582 pixeles. Sus dimensiones son 32x32x15 mm, su peso es muy pequeño, 15 g; y su consumo es mínimo, 1.35 W. Tal y como se ve, se cumplen todos los requisitos que se le piden a las herramientas del robot.

El láser, POWER DATA DISTO de la marca Leica, proporciona una ayuda a la navegación del robot a través de la estructura. Cuando el robot va a pasar de una viga a una columna, el láser mide a que distancia está de la columna, medida, que le servirá como dato para calcular la cinemática inversa y calcular cuál debe ser el giro que debe hacer en cada uno de sus ejes. Puede hacer medidas aisladas, una sola cuando se le pide, o funcionar en modo seguimiento, *tracking*, haciendo medidas continuamente. Su precisión a la hora de medir las distancias es de $\pm 5\text{mm}$ en condiciones normales con una capacidad de hacer aproximadamente 400 medidas sin necesidad de volver a recargar las baterías. La comunicación con el ordenador central del robot es vía serie RS-232.

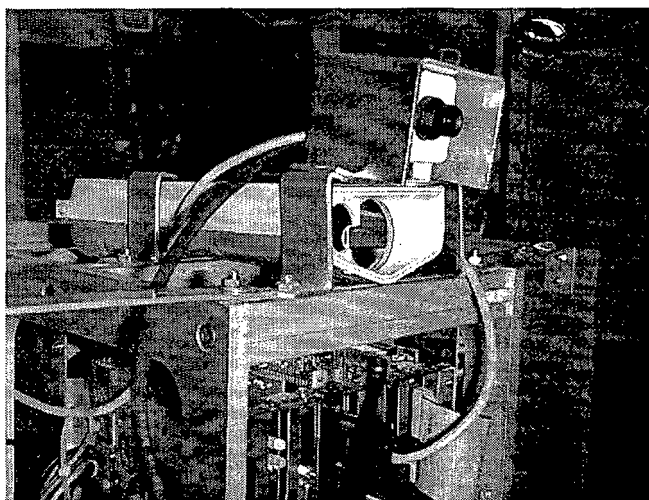


Figura 4.26 Cámara y telémetro láser

Los dos sensores van colocados en la parte superior delantera del robot, tal y como se muestra en la figura 4.26. En la siguiente figura, 4.27, se puede ver una imagen completa del robot sobre la viga, y sobre la parte superior se puede observar la cámara y el láser. En la figura 4.28 se puede apreciar cuál es el tamaño que tiene el robot ROMA, en comparación con una persona.

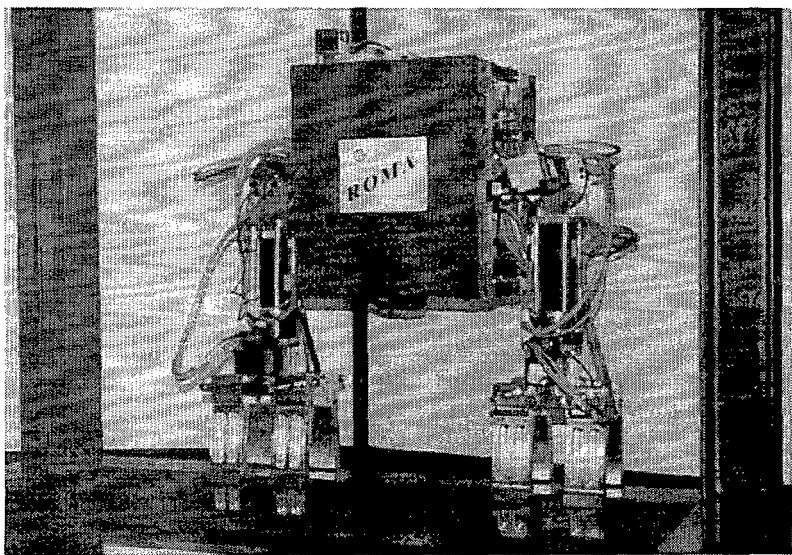


Figura 4.27 Robot ROMA

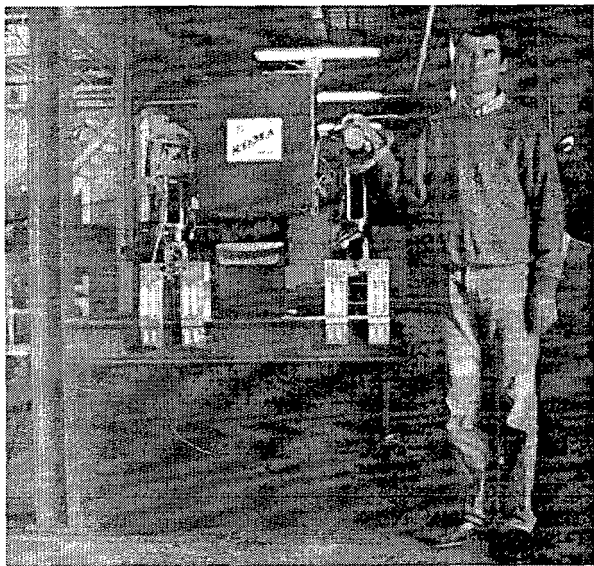


Figura 4.28 Vista general del robot ROMA

Sistema de control

5

5.1 Introducción

En este capítulo se hace un análisis detallado de las principales tareas que se realizan en cada uno de los subsistemas que componen la arquitectura de control del robot ROMA. Se da una explicación de la división que entre las dos plataformas que ayudan al completo funcionamiento del sistema; la del robot, y la del ordenador base.

Se ha creado un nuevo lenguaje de programación de robots adecuado para esta clase de robots. Asimismo, también se han desarrollado diversas herramientas que facilitan el diseño de la estructura tridimensional sobre la que se va a mover el robot, con otra importante particularidad; desde el ordenador de la base se genera automáticamente el camino que debe

recorrer el robot para inspeccionar todas las caras de la estructura tridimensional, con un mínimo consumo de energía.

Se ha distribuido el capítulo en varios apartados: primero, se explican los procesos que se encuentran en el ordenador del robot. En segundo lugar, se describen los conjuntos de programas que permiten al usuario tener un manejo fácil del robot; que principalmente son: los que se encargan del control y comunicación del ordenador que está en el robot, la interfaz que está en el ordenador base, desde el que el usuario opera con el robot, y un conjunto de programas *off-line* que permiten calcular en un nivel superior de control cuáles son las trayectorias más idóneas para recorrer toda la estructura con un gasto mínimo de energía.

Al final del desarrollo de este capítulo se exponen cada uno de los niveles de programación que se han realizado, junto con los diferentes niveles de seguridad que se han establecido para conseguir un buen funcionamiento de todo el sistema, tanto en el ordenador de la base como en el que está a bordo del robot.

5.2 Esquema general de conexión

La mayoría de los robots escaladores, al igual que los robots móviles, dividen sus programas entre dos plataformas: una en el propio vehículo, y otra en la estación base, donde se encuentra el operador de la máquina. Por tanto hay tres factores importantes a destacar en estos sistemas: que funciones se realizan en la base, cuáles en el robot, y que comunicaciones se establecen entre ellos.

En los dos ordenadores se han empleado herramientas *software* estándares, tanto en los sistemas operativos, como en los lenguajes de programación utilizados, con el fin de mantener una buena **portabilidad** y **reusabilidad** del código en plataformas distintas. Todo el trabajo realizado, que se ha aplicado al robot ROMA, puede ser fácilmente extrapolado a otros robots que tengan este mismo problema, en nivel de autonomía y de comunicación entre el computador

de la base y el vehículo móvil. Siguiendo este camino todos los programas se han dividido en diferentes módulos, donde cada uno de ellos se puede cambiar por nuevas versiones mejoradas, sin necesidad de cambiar nada en los otros. Teniendo en cuenta este método, se hace muy importante establecer los datos de intercambio entre unos bloques y otros.

La siguiente figura, 5.1, muestra una visión general de la zona de trabajo del robot, así como la situación del ordenador base, donde trabaja el operario que maneja el robot, que es el que se encarga de la teleoperación, monitorización y programación.

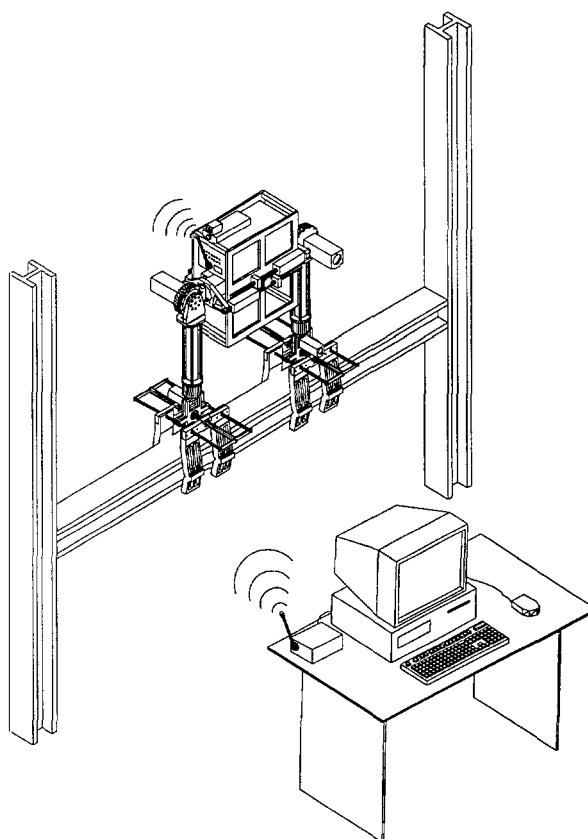


Figura 5. 1 Visión general

La comunicación entre la base y el robot, que se establece vía radio, tiene que ser fiable y segura. Si no fuese así, no se conseguiría una respuesta rápida en situaciones de emergencia del robot, que es cuando su tiempo de reacción ante cualquier situación difícil se hace más crítico. Se han establecido el mínimo número de canales de comunicación posibles entre ellos,

dejando dos especialmente dedicados a la recepción de datos de estado del robot y otro a los comandos que van en sentido contrario. Los comandos son muy cortos para no saturar en demasía las líneas y obtener tiempos de respuesta altos. El cálculo más complicado y el que tarda más tiempo en realizarse, es el de la búsqueda de la trayectoria más adecuada para recorrer toda la estructura con el mínimo gasto de energía posible. Hay que hacer notar que los algoritmos de búsqueda de estos caminos no se encuentra dentro de los objetivos de esta tesis. El tercer canal y último está establecido para el envío de las imágenes recogidas por la cámara, para que no sature los otros dos.

Asimismo, siguiendo con esta política, los cálculos de la cinemática directa e inversa se acometen en el ordenador base del robot. Las principales tareas relacionadas con los movimientos más sencillos, y la seguridad del robot se solucionan directamente en él, mandando a la base la solución que se ha tomado.

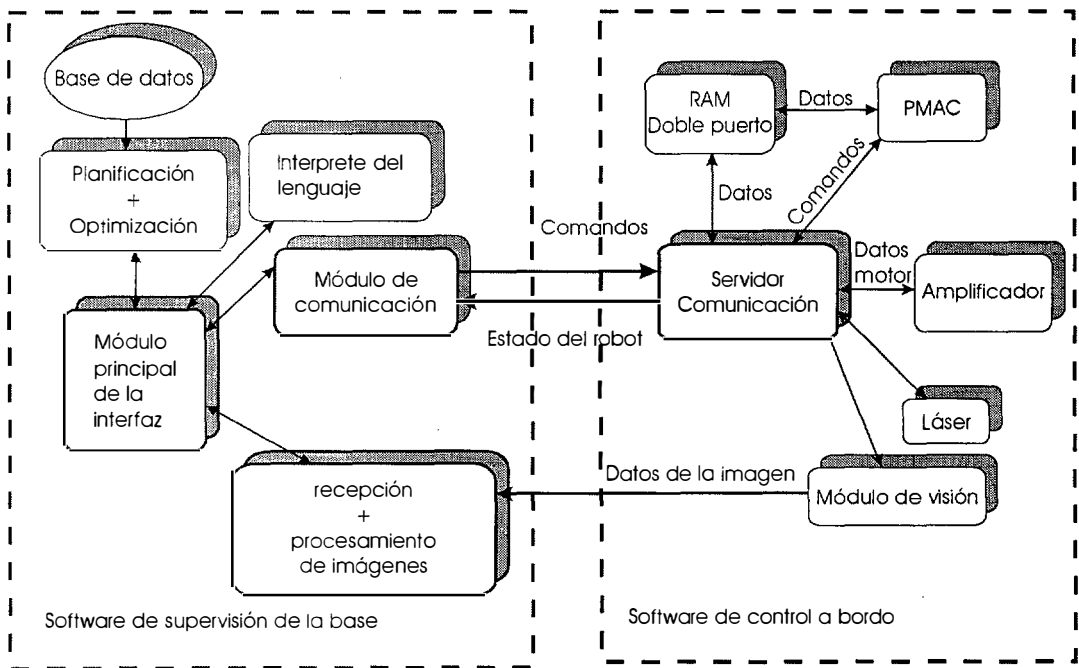


Figura 5. 2 Arquitectura general de control

5.3 Programas del robot

Todas las tareas que se hacen en el robot se distribuyen entre dos módulos: el de la CPU del robot, con un procesador Intel 486, y el que contiene la tarjeta controladora de ejes, con un DSP 56001 de Motorola. El nivel de las tareas de ejecución en cada uno de ellos es distinto; en la tarjeta controladora de ejes se encuentran las dedicadas a mover los motores, las que se encargan del control de su movimiento y de la interpolación de sus respectivas trayectorias, y la comunicación con la CPU central del robot. La CPU central se encarga de elegir cuál es el programa que se ejecuta en cada instante, de la comunicación con el ordenador de la base, y de los programas que se encargan de elegir cuál es el regulador más adecuado en cada instante para el movimiento del robot. También se encarga del funcionamiento del amplificador, cámara y láser.

El éxito del control de posicionamiento no sólo depende del sistema de control elegido y su funcionamiento, sino también de la calidad de la parte mecánica, los reductores, los actuadores, y los sensores. Es obvio que si existen holguras apreciables en los mecanismos de transmisión o no hay unos sensores con una resolución adecuada, no será posible llevar a cabo un control con gran precisión, independientemente del tipo de control que se use. Por tanto, todo el conjunto del robot influye sobre la calidad del control del mismo.

5.3.1 Funciones de la tarjeta controladora de ejes

La tarjeta de control de ejes (PMAC) tiene como tarea principal el control de las funciones que resultan críticas en tiempo real, entre las que destacan:

- La interpolación de la trayectoria articular de cada eje.
- El cierre del bucle de control para cada eje del robot utilizando servo-controladores diferentes.
- La comunicación con el control central del robot (CPU) del que recibe los parámetros de control.

- Realización de una inspección continua de la posición de todos los ejes y demás variables de interés, para una comunicación inmediata al ordenador central del robot.

La función principal de la tarjeta controladora de ejes consiste en cerrar el bucle de control de cada eje. La tarjeta presenta una estructura tan flexible que permite la posibilidad de usar un regulador en el que se pueden modificar cualquiera de sus parámetros, incluso durante el movimiento. Su esquema aparece en la figura 5.3 donde aparecen los parámetros que se pueden modificar durante el movimiento. Hay dos lazos de realimentación, que pueden ir conectados a distintos sensores de posición, pero que en el caso del robot ROMA la señal procede de los que se encuentran acoplados en los ejes de los motores. En la cadena directa están colocados los parámetros de un regulador PID que sirven para mejorar las condiciones dinámicas del movimiento de los motores y aminorar el error en régimen permanente (K_p , K_i , K_d). Además, hay dos prealimentaciones, una para compensar los retrasos dinámicos que pueden dar lugar a errores de seguimiento elevados (K_{aff}), y otra para la compensación de la fricción estática o deslizante (K_{vff}). Por último a la salida de la señal de control hay un filtro de segundo orden (*Notch Filter*) para atenuar el ruido que pueda contener la señal en determinadas frecuencias.

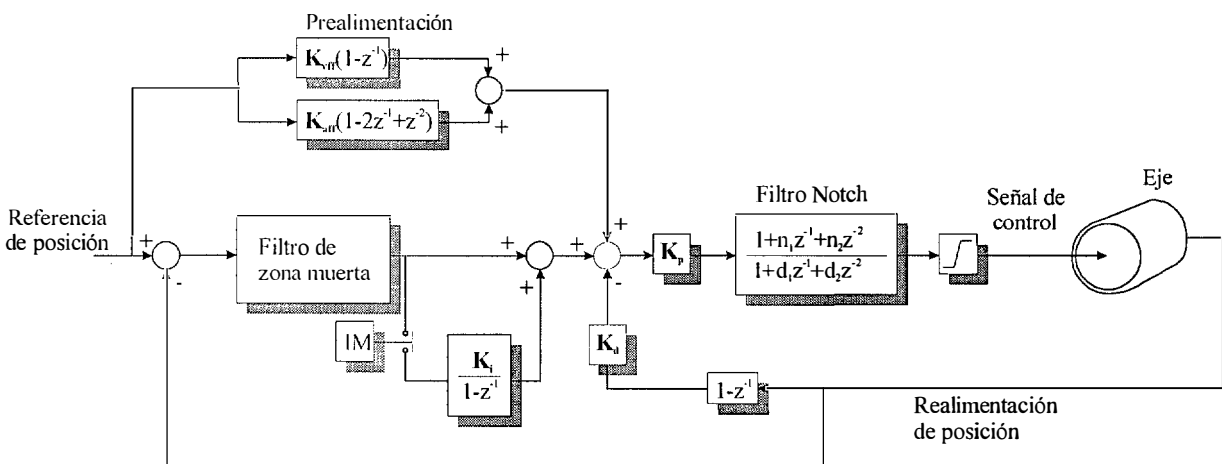


Figura 5. 3 Control PID de una articulación

La tarjeta posee capacidad para calcular una trayectoria predefinida para el extremo del robot en cada momento, controlando las posiciones $q_i(t)$ de cada articulación. La planificación

de trayectorias incluye encontrar la trayectoria deseada a partir de unos determinados puntos de paso (*via points*), generalmente expresados en el espacio cartesiano. En la presente tesis no se considera este problema porque el robot ROMA solo se puede mover una articulación en cada instante, según se comentó en el capítulo 4. Sin embargo, sí se tienen en cuenta dos aspectos muy importantes: el primero de ellos es la conversión de la trayectoria especificada en el espacio de trabajo cartesiano al espacio que ha sido tratado en cuanto a su modelización también en el capítulo 4. El segundo aspecto que se considera en este epígrafe, es el de la reconstrucción de una trayectoria continua deseada a partir de una tabla de puntos que vienen dados por las instrucciones de movimiento a la hora de desarrollar una tarea de inspección del robot a lo largo de la estructura.

A la hora de mover un eje a una determinada posición también hay que elegir cuál va a ser la velocidad y aceleración en cada instante. Este aspecto, es muy importante, pues en función del valor de estos dos factores se generarán distintos valores en los pares de fuerza, y en consecuencia se estará determinando el comportamiento dinámico del sistema. Eligiendo perfiles de velocidad y aceleración adecuados, no habrá cambios bruscos en estas magnitudes, y así se podrá conseguir que la estructura mecánica del robot sufra lo mínimo posible.

Normalmente, se elige el perfil de velocidad, y éste determina el de la aceleración. Para definir estos perfiles de velocidad se suelen utilizar polinomios de interpolación cúbicos, donde la aceleración en cada instante es lineal. No obstante, en muchas aplicaciones prácticas existen razones evidentes para trabajar con aceleraciones constantes; por ejemplo, cualquier robot tiene límites en cuanto al par que pueden proporcionar sus actuadores. En el caso de sistemas lineales esto se traduce en aceleraciones constantes, siendo más improbable que se produzcan saturaciones en los actuadores. La mayoría de los robots industriales con controladores digitales están programados para utilizar aceleraciones constantes entre cada instante de muestreo; lo que se conoce en la literatura de control como un bloqueador de orden cero.

La tarjeta controladora de ejes dispone de cinco modos básicos de interpolación de trayectorias que ofrecen una gran flexibilidad en la programación y permiten la realización de



movimientos suaves, evitando saturaciones y variaciones bruscas. En el caso de robots escaladores, donde los esfuerzos dinámicos suelen estar al límite de lo que soporta la estructura mecánica, es de vital importancia la elección de perfiles adecuados de posición, velocidad y aceleración. En este sentido, si no se reduce el amortiguamiento de la estructura se pueden provocar oscilaciones no deseables durante el arranque o la parada de los movimientos, que pueden llevar incluso hasta a la rotura mecánica de algún eslabón del robot. Entre los diferentes modos de interpolación que ofrece la tarjeta de control de ejes, son de gran utilidad para un robot los modos lineal, posición-velocidad-tiempo (PVT) y *spline*.

La tarjeta permite escribir dos clases de programas: los relacionados con el movimiento, y programas lógicos. Con los primeros se pueden mover los ejes con el control PID y los perfiles de velocidad antes mencionados. Con los programas lógicos se pueden leer diferentes registros de la tarjeta que almacenan información de diferente índole, y en función de estos actuar sobre otros distintos. Con los programas lógicos se puede hacer cualquier cosa excepto instrucciones que supongan movimiento de cualquier eje. Son programas de autómatas, que se ejecutan en un segundo plano de los de movimiento, con un ciclo aproximado de 1 milisegundo, pudiendo ejecutarse varios programas a la vez.

En el caso concreto del trabajo desarrollado en la tesis, los programas lógicos se usan para obtener información de la posición de cada eje, que motor ha llegado a su posición de consigna, que programa de movimiento se está ejecutando en cada instante, y que frenos están activados. Esta información se escribe en la DPRAM, a la que también tiene acceso el procesador central del ordenador de a bordo, con lo que se conoce en cada momento cuál es el estado general del robot.

Asimismo, hay otro programa que comprueba que eje es el que se está moviendo, hacia donde se mueve, siguiendo diferentes estrategias de control que se explicarán en el capítulo 7 de la presente tesis, y los nuevos valores de prealimentación, dejando en cada momento el regulador más adecuado a las características del movimiento. No será lo mismo mover un eje cuando sube que cuando baja porque el efecto de la gravedad es distinto.

5.3.2 Funciones del ordenador central del robot

La tarea principal del ordenador central es el establecimiento de un puente de comunicación entre el ordenador de la base y la tarjeta de control de ejes, pero no es la única ni la más importante. No es un mero transmisor de datos entre uno y otro; también tiene otras operaciones muy importantes que le confieren cierto grado de autonomía en la toma de decisiones sobre las acciones a realizar.

El ordenador central del robot se encarga de:

- Calcular los parámetros más adecuados para cada regulador en función de las condiciones de funcionamiento.
- Control y supervisión del estado del robot, realizando una inspección continua de las funciones que garantizan un trabajo seguro del sistema.
- Control del amplificador, que es el encargado de transmitir la señal de control a los actuadores del robot.
- Interpretación y procesamiento de las instrucciones del lenguaje especialmente diseñado para este robot, y que será descrito más adelante.
- Planificación de diferentes movimientos combinados.
- Control de los dispositivos externos que posee el robot: la cámara y el láser.
- Comunicación con el ordenador base, donde se encuentra el operario que maneja el robot.

Para poder cambiar los valores de cada uno de los reguladores de cada uno de los ejes, el ordenador tiene un proceso que lee los datos que los programas lógicos de la tarjeta de control de ejes anteriormente mencionados dejan en la memoria RAM de doble puerto (DPRAM). En función de estos se elige cuál es el PID más adecuado para el movimiento que se vaya a realizar. Los valores del PID adecuado se vuelven a colocar en la DPRAM para que el programa lógico antes mencionado los recoja para colocarlos en los registros dedicados a los distintos reguladores de la tarjeta de control de ejes. Todo este proceso es bastante rápido ya que los accesos de lectura y escritura en la memoria RAM son muy rápidos. Los cambios del PID se

pueden realizar en línea, con lo que se consigue cambiar la configuración del regulador a una velocidad muy alta, pudiéndose llevar a cabo, incluso durante el movimiento de un eje.

Estos mismos datos anteriormente mencionados, junto con los obtenidos por otro proceso que está en contacto permanente con el amplificador, mediante una conexión vía serie RS-232, permite tener un control autónomo en el robot. Este último proceso es el que decide si se mueve un motor u otro, si es necesario activar un freno u otro, o si es necesario cambiar los parámetros internos del amplificador. Si surge algún error en el amplificador o en la tarjeta de control de ejes intenta arreglarlo. Si no le fuese posible, enviaría un mensaje de error al ordenador de la base para que sea el usuario quien lo subsane.

Los comandos que se reciben desde la base de operaciones, escritos por el usuario en un lenguaje de programación de robots sencillo, son traducidos por el proceso servidor de comunicación al lenguaje de programación de la tarjeta de control de ejes; lenguaje muy parecido al usado en controles numéricos; lenguaje mucho menos comprensible para un programador de robots, además de ser de muy bajo nivel. Posteriormente los envía a la tarjeta para llevar a cabo las ordenes recibidas desde la estación base. Si los comandos enviados corresponden a movimientos complejos, se dividen en movimientos más básicos, primitivos, tal y como se ha descrito en el capítulo 4. En estos casos se hace necesario calcular la cinemática directa o inversa para obtener el giro o desplazamiento preciso de cada articulación, ya que sólo se puede mover una articulación a la vez. Por tanto, las ecuaciones obtenidas en el capítulo 4 que resuelven los problemas cinemáticos directo e inverso están implementadas en el código del proceso servidor. Por supuesto también se elige cuál es la configuración que se necesita de las 4 contempladas. Hay que recordar que la numeración de las distintas articulaciones cambia dependiendo de la pinza que se queda sujeta, que es la que se considera como la base del robot en ese instante.

Otro proceso distinto de los anteriormente mencionados, es el que se encarga de la obtención de la imagen de la cámara, su digitalización y el envío vía *ethernet* radio. El otro dispositivo del sistema sensorial, el telémetro láser, también se controla desde este proceso. La

comunicación con el láser es muy fácil, y se hace con un protocolo muy básico. Las medidas se pueden obtener de dos formas: realizando medidas aisladas cuándo interese, o con una medición continua de la distancia a la que se encuentra la columna que está enfrente del robot.

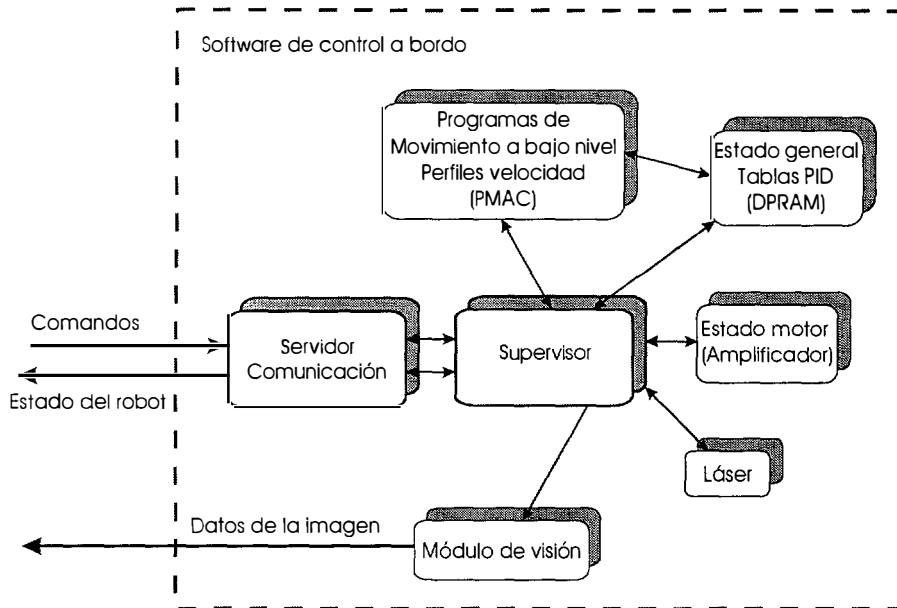


Figura 5. 4 Esquema general de la CPU del robot

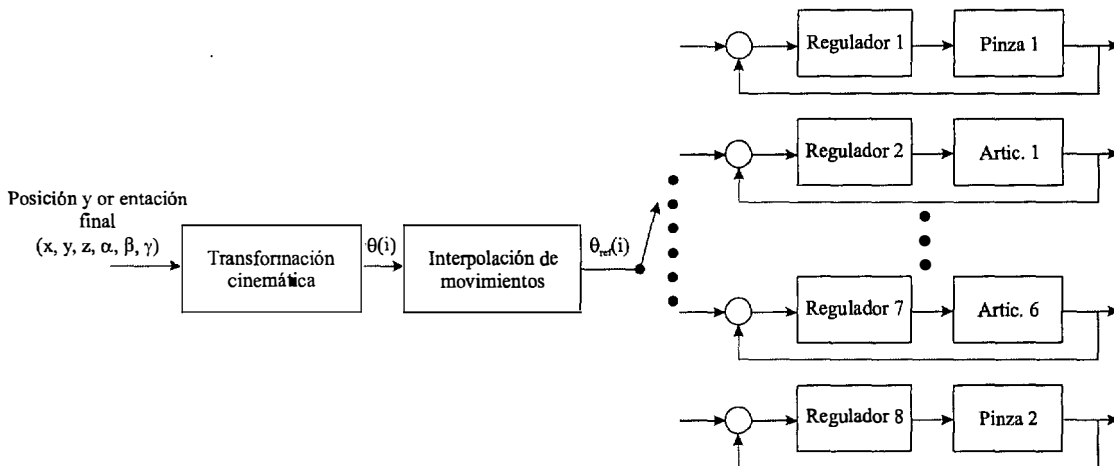


Figura 5. 5 Transformación de las ordenes

Los procesos que se ejecutan en la CPU están escritos en ANSI C, y corren bajo el sistema operativo Linux slakware 2.0. Para poder trabajar en este sistema operativo con todas las tarjetas electrónicas que hay en el ordenador del robot, ha sido necesario realizar dos

controladores, o *drivers*: uno para la tarjeta de control de ejes y otro para la memoria RAM de doble puerto (DPRAM), para que se puedan usar las dos tarjetas con este sistema operativo. En el caso de la tarjeta de control de ejes se usa una comunicación por interrupción para tener una comunicación rápida y segura con ella. La DPRAM trabaja como una zona de memoria compartida entre los dos procesadores que están en el robot. En total son 4 Kbytes, espacio suficiente para el intercambio de datos entre los dos.

5.4 Programas en el ordenador de la base

El objetivo básico del sistema es mantener un completo control y monitorización del robot desde un terminal en tierra, que estaría situado en la base de la obra que se quiere inspeccionar. La plataforma que se ha usado durante el desarrollo de esta tesis es un ordenador personal, donde todas las aplicaciones realizadas son fácilmente trasladables a un ordenador portátil, que a la hora de trabajar a pie de obra siempre será mucho más sencillo de transportar. La única condición que debe cumplir la plataforma de la base es que la comunicación que se establezca con el ordenador del robot sea por medio de una señal radio con protocolo de comunicación Ethernet. Se ha tenido en cuenta que el operador que maneje el robot no tenga que estar necesariamente cualificado, y le baste con un pequeño entrenamiento para conocer todas las capacidades de la máquina.

Para ello, se ha desarrollado una interfaz gráfica de operación y monitorización del robot y elementos de control, que corren en el computador de la base. Todo el desarrollo se ha realizado utilizando librerías gráficas de Motif, sobre Xlib, y con Linux RedHat 5.0 como sistema operativo. La interfaz ha sido diseñada con una filosofía modular y abierta permitiendo una futura reusabilidad y escalabilidad. Ella y sus programas asociados se han escrito usando el lenguaje de programación C++ para implementar los desarrollos como objetos. Cada uno de los elementos de la interfaz se añaden como módulos separados. Los nuevos pueden ser añadidos para aumentar la funcionalidad y la “amigabilidad” del sistema permitiendo además, nuevos

desarrollos y posibilidades de programación. Toda la interfaz es totalmente compatible con un sistema de programación fuera de línea que también corre en esta plataforma.

Hay que tener en cuenta que en la actualidad no existe ningún tipo de estandarización en lo referente a las comunicaciones en sistemas de teleoperación. Por otro lado es una parte fundamental tanto en su desarrollo como en su utilización, ya que éstas resultan imprescindibles debido a la necesidad de comunicar dos sistemas separados por una mayor o menor distancia. La interfaz gráfica que posibilita la teleoperación, monitorización y programación del robot se ha desarrollado especialmente para este proyecto, aunque es fácilmente adaptable a cualquier otro caso. Su ventana principal se puede ver en la figura 5.6. Sobre esta base corren los programas de supervisión y monitorización, la interfaz, junto con los que se encargan de elegir los caminos que debe seguir el robot por la estructura.

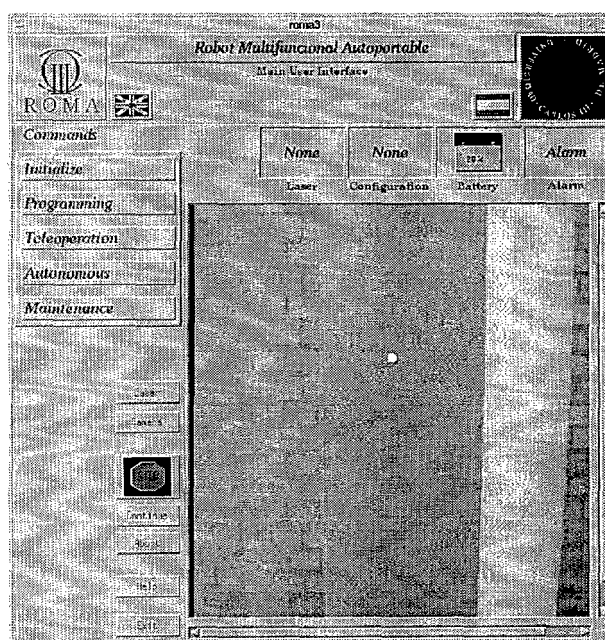


Figura 5. 6 Interfaz principal

La interfaz incluye los siguientes desarrollos principales:

- Tiene un conjunto sencillo de ventanas desplegables, con lo que se ha conseguido un entorno de fácil manejo.

- Modos de movimiento teleoperado o autónomo
- Creación y edición de programas específicos para el robot. También posee un módulo que permite una generación automática de estos programas a partir de la tarea que se quiere realizar.
- Posibilidad de mandar comandos de nivel más bajo a la tarjeta de control de ejes.
- Estado del robot, incluyendo su posición en la estructura, su configuración cinemática, el nivel de las baterías, alarmas, etc.
- Información sensorial, que consiste en la imagen actual de la cámara y la última lectura del telémetro láser.

La ventana principal de la interfaz proporciona una imagen en directo de la estructura metálica que se encuentra enfrente del robot, figura 5.6. La imagen de la cámara, situada en la parte inferior derecha de la interfaz, permite al operador tener una telepresencia real. La imagen de la cámara se puede salvar en cualquier momento y almacenarla en un fichero para un posterior análisis. Desde la ventana principal se habilita o no el envío de imágenes captadas por la cámara. Cuando esta opción está deshabilitada, la última imagen tomada se conserva en la interfaz y la imagen vuelve a refrescarse cuando se vuelve a autorizar.

La comunicación entre la interfaz y el control de programas, con un nivel de tarea más alto que el visto en el epígrafe anterior, se desarrolla en el computador del robot estableciendo entre las dos plataformas tres canales basados en una arquitectura cliente-servidor. El servidor, que es el programa principal, se ejecuta en el computador del robot. Este espera la conexión del programa cliente que podría correr en cualquier computador con una tarjeta de radio Ethernet, como ya se comentó anteriormente. Después, el servidor entra en un bucle y espera cualquier comando enviado por el cliente y por turno lo reenvía a su correspondiente destino, ya sea otro proceso o al dispositivo correspondiente: tarjeta de control de ejes, cámara, láser, o amplificador.

La interfaz y sus programas asociados corren sobre dos procesos paralelos que intercambian información. El establecimiento de este intercambio se ha implementado por

medio de señales y memoria compartida. La figura 5.7 ilustra la interconexión de los módulos de la interfaz. El proceso principal es el responsable de la interacción con el usuario y envía ordenes al servidor del ordenador del robot por medio del primer canal. El segundo canal, configurado en modo asíncrono, se usa para la lectura de información que proviene del servidor. La lectura sólo se dispara cuando los datos están listos para su envío. El módulo responsable de la recepción de los datos de la imagen se ejecuta en un proceso paralelo, que continuamente está leyendo de la tarjeta de adquisición de datos por medio del tercer canal. Cada vez que se completa los datos de una imagen (*frame*), los datos se procesan para crear la imagen en formato “pxm”. Esto datos se colocan en un área común accesible por el módulo principal, que recibe la señal indicando que se ha completado un ciclo. Finalmente, el módulo principal dispara la función encargada de refrescar la imagen de la cámara sobre la interfaz.

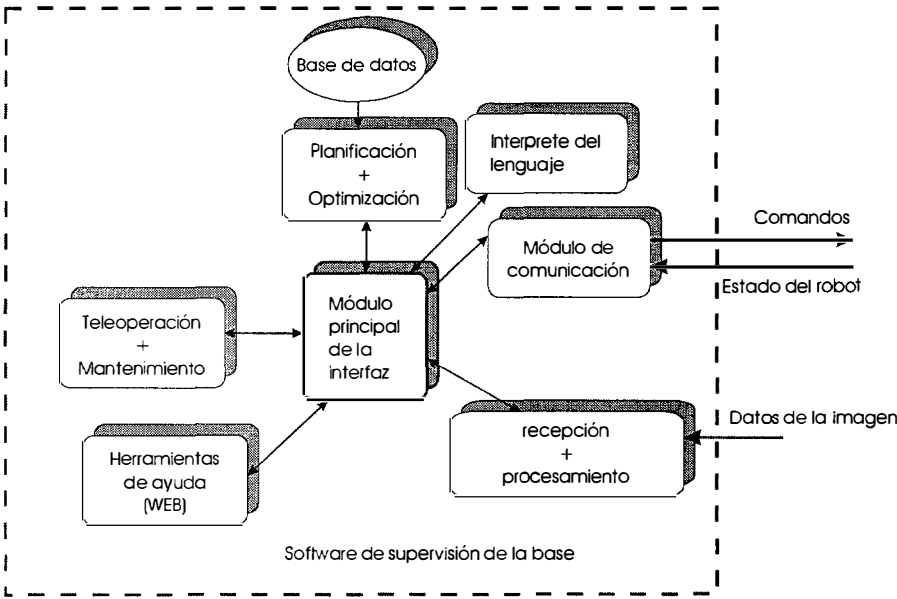


Figura 5. 7 Módulos de la interfaz

La teleoperación del robot se lleva a cabo por medio de una paleta simulada como la que se muestra en la figura 5.8, de la interfaz principal. Ofrece un dispositivo simple e intuitivo que permite teleoperar el robot eje por eje, o mandando comandos más complejos por medio de una línea de comandos. Las ordenes de teleoperación se ejecutan secuencialmente; una orden no se ejecuta hasta que los comandos previos lo hayan hecho ya o se hayan abortado previamente.

Los datos relacionados con la nueva posición del robot son enviados regularmente al computador de la base y la información se actualiza en la ventana de teleoperación

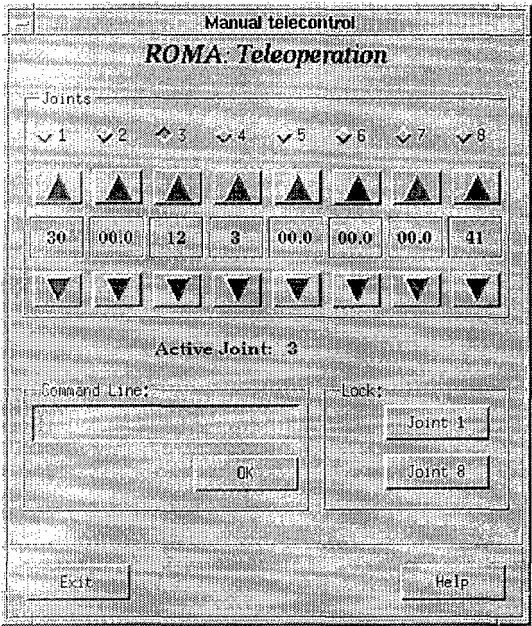


Figura 5. 8 Ventana de teleoperación

Todas las interacciones del usuario con la interfaz, a cualquier nivel, producen un comando interno o una serie de comandos que son analizados antes de ser enviados al computador del robot ROMA. Si tienen algún error no se envían y aparece una ventana que muestra el error en el comando. Por ejemplo, por seguridad es imposible soltar una pinza hasta que se compruebe que la otra esté bien cerrada sujetándose a la viga. De no ser así, no se envía la orden; y aparece una ventana indicando que la pinza no se puede abrir porque la otra no está bien sujeta.

La edición de los programas de nivel más alto con las tareas que debe realizar el robot se lleva a cabo en la ventana que se muestra en la figura 5.9. El primer paso de este proceso empieza con la definición de la estructura que hay que inspeccionar usando un editor gráfico. Esto también se puede lograr usando un lenguaje especial editado por defecto en un editor ASCII cualquiera. Seguidamente, se seleccionan los puntos que se quieren visitar en la estructura para cumplir la tarea definida. Tercero, se realiza el cálculo y generación automática

de las trayectorias teniendo en cuenta diferentes criterios de optimización tales como el consumo mínimo de energía, o el de par mínimo en cada movimiento o primitiva para todo el recorrido. Por último, se realiza la codificación automática del programa del robot para una tarea definida.

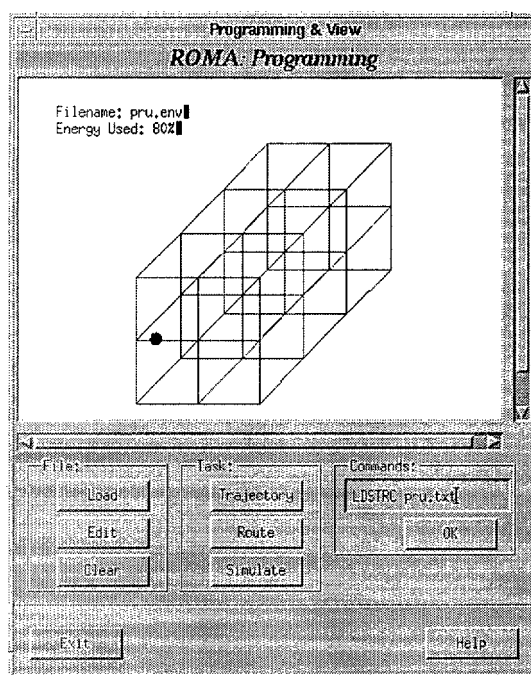


Figura 5.9 Ventana de programación

La codificación del programa también se puede hacer manualmente, pero en estructuras más grandes y complejas es más apropiado hacer esta trabajo automáticamente con el uso de la anterior herramienta y permitir que sea ella quién tenga cuidado en la búsqueda de la mejor trayectoria. En la figura 5.10 aparece un listado del fichero para definir la base de la estructura y que aparece en la figura 5.9 y una tarea a desarrollar en ella.

Una vez que se determina y se genera el camino, la misma herramienta ofrece una simulación, que visualiza como se mueve el robot por la estructura definida, indicando además, el consumo de energía durante todo el recorrido, ver figura 5.9. El punto que hay en la estructura representa al robot; las vigas y las columnas cambian de color para reflejar cuantas veces ha pasado el robot por ellas. La misma facilidad de visualización se proporciona durante

el movimiento del robot en modo autónomo. Esto es, cuando el robot se encuentre ejecutando un programa determinado.

```
ROBOT "roma.rob"
#Task Name
NAME "edif900.tsk"
#####
BEGSTC
#Initial Node
N, 1, 0, 0, 0
#First Line
rn, 1, 1, 1, 2, 3, DX, 1
#First Floor
rn, 1, 4, 1, 5, 2, Dy, 1
#Horizontal (X) Beams
B, 1, 1, 2
rb, 1, 1, 1, 2, 2, 1
rb, 1, 3, 1, 4, 2, 4
#Horizontal (Y) Beams
b, 10, 1, 5
rb, 10, 10, 1, 11, 3, 1
rb, 12, 15, 1, 16, 1, 4
ENDSTC

#TASK DEFINITION
IPOS, 1, 1, 1
TFACES
```

Figura 5.10 Definición de una estructura y una tarea a realizar en ella

La interfaz también se encuentra preparada con la facilidad de una programación de bajo nivel para enviar comandos directos a la tarjeta de control multiejes, usando el mismo lenguaje que proporciona el fabricante de la tarjeta. Una comunicación directa con la tarjeta sirve para conocer los fallos que ocurren, resetear el robot, sincronizarlo, calibrarlo, cambiar los parámetros de control y ayuda para llevar a cabo otras tareas importantes de mantenimiento tales como preguntar por los estados de los motores, y las ganancias de corriente de cada uno de ellos. La ventana de mantenimiento que se muestra en la figura 5.11 contiene respuestas simples a algunas preguntas que se le hace a la tarjeta de control de ejes.

Existe un módulo dedicado a que el usuario conozca los posibles errores que han podido surgir durante el manejo del robot. Estos mensajes son enviados en dos categorías distintas; errores importantes, y simples advertencias de que algo puede fallar, *warnings*. En ambos casos,

cuando aparece la ventana de error se dan consejos o sugerencias para solucionar el problema. Por ejemplo, cuando el robot intenta mover un motor donde ha ocurrido un error de sobrecorriente, el servocontrolador manda una advertencia a la interfaz principal causando una ventana de mensaje, de la clase *warning*. Los programas de control intentan arreglar la causa del problema para continuar con la ejecución de la tarea iniciada. Sin embargo, si el problema persiste el robot entra en un estado de espera hasta que el operador interviene y arregla el problema. Una vez resuelto se vuelven a dar instrucciones al robot de que continúe con la ejecución del resto de la tarea. Si una vez subsanado el error, el robot no se sigue moviendo, se advierte al operador de que aborte la tarea iniciada e investigue la fuente del error.

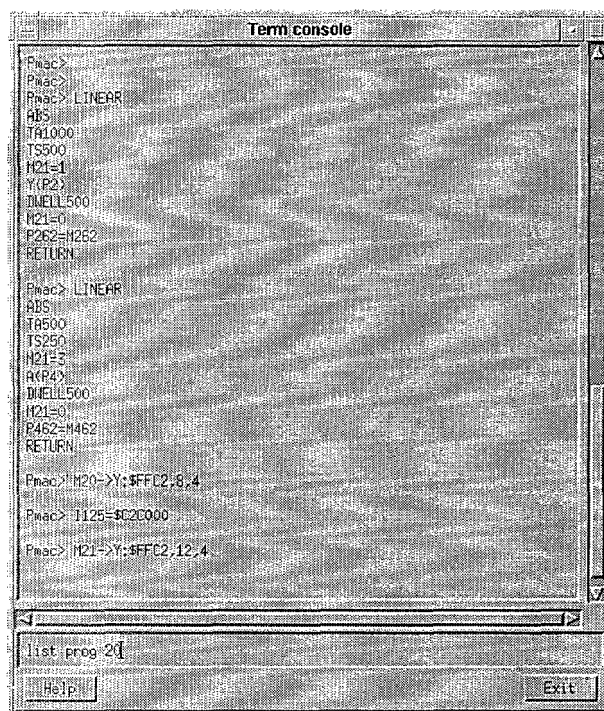


Figura 5. 11 Ventana de mantenimiento

Existen una serie de ventanas de ayuda, que usan hipertexto, e incluso se pueden leer desde cualquier herramienta de navegación por Internet. En cada una de ellas, el operador puede encontrar diferentes consejos que hacen del manejo de la interfaz un trabajo más sencillo, explicándole los diferentes usos que tienen cada una de las ventanas que se han comentado en este epígrafe. La misma ayuda contiene un apartado donde se pueden encontrar los diversos

comandos e instrucciones que existen para controlar el robot tanto en modo autónomo como teleoperado.

5.5 Lenguaje de programación del robot ROMA

Con el motivo de facilitar al usuario el control de todas las acciones que puede realizar con el robot ROMA se ha diseñado un lenguaje sencillo. El lenguaje es capaz de informar al sistema de control de los parámetros que le son necesarios para su funcionamiento según la estrategia propuesta.

No se ha pretendido generar un lenguaje nuevo, dentro de los muchos ya existentes en el mundo de la robótica, sino la adaptación de diferentes lenguajes de programación de robots ya existentes, tales como Rapid, VAL, V+, etc. También existe una notable similitud entre el lenguaje diseñado y el que usan los simuladores gráficos ROBCAD (lenguaje TDL) y TOROS (*Toolbox for Robot Simulation*) desarrollado en DISAM [Balaguer, 93], [Giménez, 93]. De esta manera, cualquier programa del robot ROMA se puede analizar en sendas herramientas de simulación gráfica, antes de ejecutarlo en el sistema real. El lenguaje tiene comandos que se utilizan, para que el robot trabaje tanto de forma automática como teleoperada.

La sintaxis del lenguaje es la siguiente; las instrucciones están separadas por punto y coma “;” y se colocan en líneas distintas. El primer campo de la instrucción es el comando que se quiere ejecutar, y tras un espacio en blanco “ ” se colocan los parámetros que acompañan a dicho comando si los necesita; si fuesen varios irían separados por comas “,”. La siguiente tabla muestra cada uno de los comandos que se pueden utilizar, su sintaxis, y una breve explicación de su funcionamiento.

Comando	Sintaxis	Función
<i>MoveJoint</i>	MoveJoint <eje>, <posición>;	Se mueve la articulación que se indica en el parámetro <eje>, y tantos grados como los que están escritos en el campo <posición>
<i>Moveforward</i>	MoveForward <posición>;	Se mueven el conjunto de articulaciones necesarias para que el robot avance tantos milímetros como se indica en el campo <posición>.
<i>Movebackwards</i>	MoveBackwards <posición>;	Se mueven el conjunto de articulaciones necesarias para que el robot retroceda tantos milímetros como se indica en el campo <posición>.
<i>UnlockJoint</i>	UnlockJoint <pinza>;	El robot abre la pinza que se ha indicado en el campo <pinza>, controlando en el movimiento la posición y el rango de apertura de la pinza
<i>LockJoint</i>	LockJoint <pinza>;	El robot cierra la pinza que se ha indicado en el campo <pinza>, controlando en el movimiento la posición y el rango de apertura de la pinza
<i>UnlockGripper</i>	UnlockGripper <pinza>;	El robot abre la pinza que se ha indicado en el campo <pinza>, controlando en el movimiento el par que se produce en el agarre
<i>LockGripper</i>	LockGripper <pinza>;	El robot cierra la pinza que se ha indicado en el campo <pinza>, controlando en el movimiento el par que se produce en el agarre
<i>Release</i>	Release <eje>;	Se suelta el freno del eje que aparece en el campo <eje>
<i>Break</i>	Break <eje>;	Se activa el freno del eje que aparece en el campo <eje>
<i>Laser</i>	Laser;	El láser mide la distancia a la que está la columna que se encuentre enfrente del robot
<i>CamaraOn</i>	CamaraOn;	La cámara empieza a tomar imágenes del entorno
<i>CamaraOff</i>	CamaraOff;	La cámara deja de tomar imágenes, y la interfaz mantiene la última que se obtuvo.
<i>WaitTime</i>	WaitTime <tiempo>;	Espera un tiempo determinado dado en ms.

Tabla 5. 1 Lenguaje de programación

5.6 Niveles de seguridad

Cualquier robot escalador se mueve por entornos que son bastante complejos, y sobre todo peligrosos, donde cualquier fallo que se produzca puede provocar su caída, y esto podría

conllevar a la completa inutilización de la máquina. Para prevenir los posibles accidentes que se pueden producir, hay que comenzar por detectar cuáles son los posibles fallos que pueden ocurrir, analizar después porqué se originan y más tarde determinar como se pueden evitar.

Es lógico que la mayoría de las decisiones que haya que tomar ante la aparición de un fallo se hagan rápidamente, se tomen en el ordenador que hay en el robot, y no tenga que intervenir el ordenador de la base. A éste sólo debe llegarle una notificación del error que se ha producido, y si ha sido subsanado o se debe intervenir desde la base o incluso manualmente para arreglarlo. Es decir, si el robot está subiendo y al alargarse (articulación cuatro) el motor falla, inmediatamente debe activar el freno de dicha articulación y cerrar la pinza que estaba abierta para que se mantenga bien agarrado. Si robot puede arreglar el fallo, enviará solamente un mensaje de error a la base, y si no ha sido capaz de arreglarlo, avisa para que el operario intervenga.

Las medidas de seguridad que se llevan a cabo se deben tener en cuenta durante el proceso de diseño, para que queden reflejadas en la parte mecánica, en la eléctrica (cableado, motores, fuente de alimentación, etc.) y en la electrónica (tarjetas, multiplexores, etc.). Por último, los programas que controlan el funcionamiento del robot tienen que estar continuamente en alerta para detectar la posible aparición de fallos antes de que se produzcan.

5.6.1 Diseño mecánico

Los mecanismos de transmisión tienen una alta relación de reducción, especialmente en las pinzas y la articulación cuarta considerando la primera configuración, la prismática, las tres tienen un alto grado de irreversibilidad; basta una fuerza pequeña en la parte del eje del motor para mover la transmisión, pero si se quiere hacerlo desde el eje de salida, la fuerza que se necesita es muy elevada. Por ejemplo, el motor que mueve los dedos de las pinzas puede abrirlas o cerrarlas fácilmente, pero si la fuerza está aplicada en los dedos de las pinzas (fuerzas de reacción de la viga) intenta abrirlas, estas no se moverán. La gran irreversibilidad que presentan las pinzas se debe al paso tan pequeño que tienen sus husillos, y en el caso del eje de traslación al engranaje helicoidal unido al conjunto piñón-cremallera

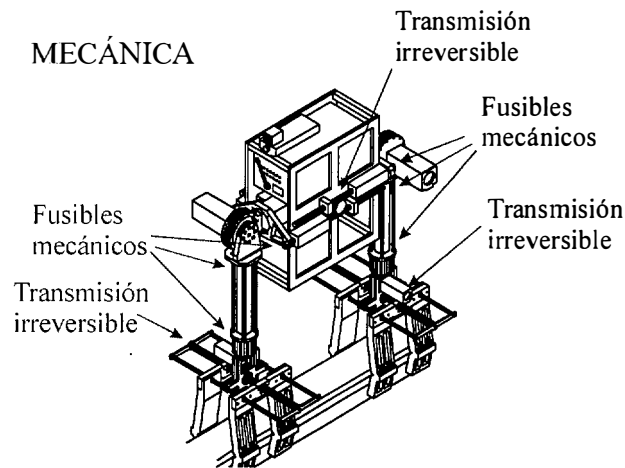


Figura 5.12 Medidas de seguridad mecánicas

Asimismo las piezas que soportan los esfuerzos más elevados en determinados movimientos tienen partes pequeñas que en el caso de que estén sometidas a pares muy grandes se rompen antes que las principales. Es más fácil cambiar un tornillo, un pasador o una guía que volver a fabricar una pieza más grande de diseño complicado. Esto es lo que comúnmente se llaman fusibles mecánicos.

5.6.2 Diseño eléctrico y electrónico

El amplificador recoge continuamente el comportamiento dinámico del sistema, tiene una señal continuamente conectada con la tarjeta de control de ejes, de tal forma, que si alguno de ellos detecta algún error en los accionadores, en la alimentación, o en la recepción de las señales de posición de los ejes, las señales *Amplifier enable*, o *Amplifier ok*, se activan y se deja de dar potencia a los motores y se paran al instante; a continuación se desactivan los frenos.

El amplificador mide continuamente la corriente que consume el motor del eje que se está moviendo en ese instante, si la corriente consumida es mayor a su nominal durante un cierto tiempo, el amplificador avisa que puede haber un fallo por sobrecorriente, *warning*. Si este consumo persiste, corta la corriente al motor. La señales *amplifier ok* deshabilitada llega a la tarjeta de control de ejes que activa el freno inmediatamente.

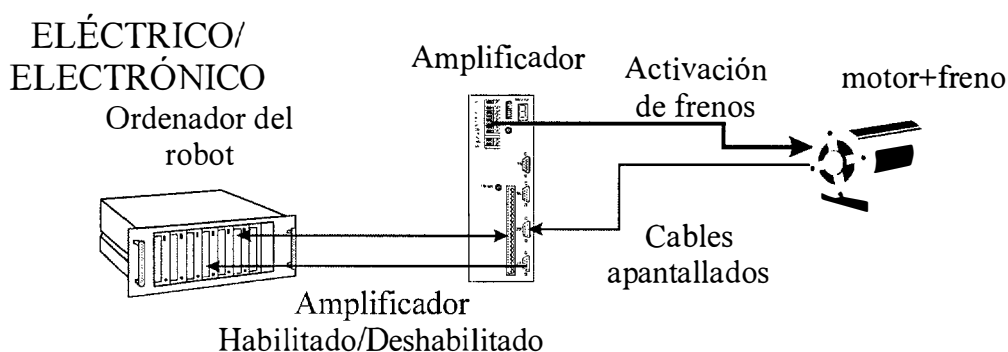


Figura 5.13 Medidas de seguridad eléctricas y electrónicas

Los cables deben estar bien apantallados para que no haya ningún tipo de ruido en las diferentes señales que llegan al ordenador del robot y a la tarjeta de control de ejes. Además, se precisa una buena conexión para que el cable no se suelte durante el movimiento de las articulaciones. En definitiva, cualquier fallo producido en las conexiones eléctricas en el robot debe conducir a la activación de todos los frenos.

5.6.3 Medidas software

Al poner en marcha el robot, es bueno realizar una comprobación de señales de autodiagnóstico en la unidad de control donde se comprueba el estado general del robot: niveles de tensión de las fuentes de alimentación, leds indicadores, mensajes de error, comunicaciones entre los diferentes dispositivos, estado del amplificador, tarjetas multiplexoras, etc.

La tarjeta de control de ejes posee dispositivos para controlar que la velocidad del motor es la adecuada. Si se le ordena ir a una posición determinada a una articulación cualquiera comprueba que se mueve en ciertos límites (*following error*) y si es demasiado grande el error para el motor. Asimismo cada articulación tiene unos límites que no puede sobrepasar, si se llega a ellos la tarjeta no mueve el motor.

Un programa supervisa continuamente el estado general del robot, comprobando si todo marcha bien. Este proceso puede prevenir la aparición de algún fallo, si comprueba que alguna variable no está dentro de su rango establecido; por ejemplo el accionador da un aviso de

sobrecorriente en el motor, avisa al proceso supervisor para que deshabilite al accionador para no quemar el motor, y activa todos los frenos.

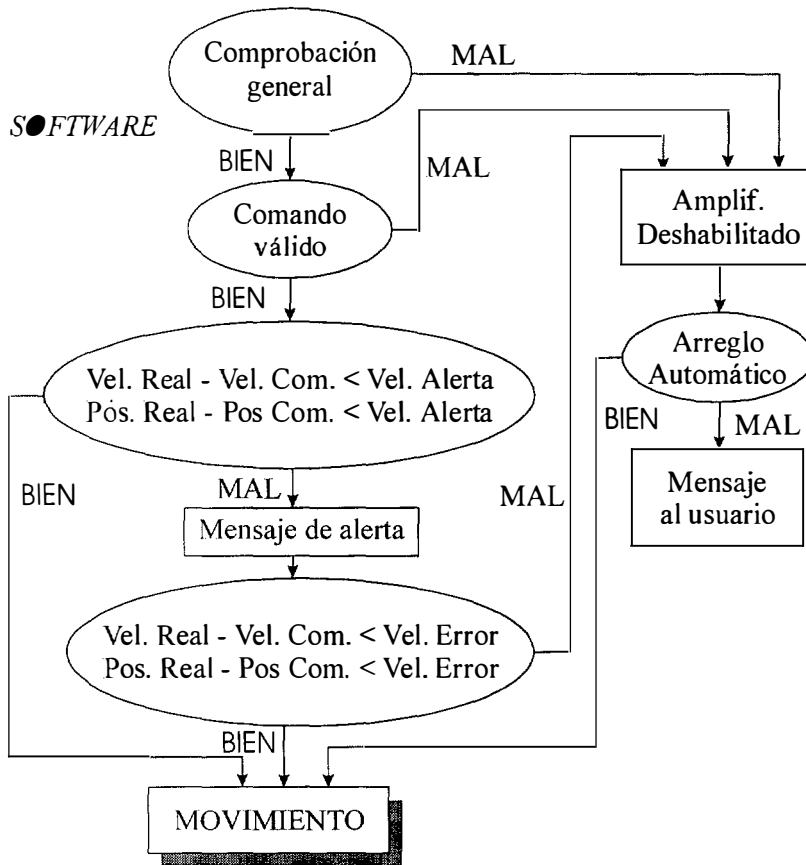


Figura 5.14 Medidas de seguridad *software*

El proceso principal del ordenador del robot comprueba que todas las órdenes que le llegan se pueden realizar sin ningún problema, para que el robot se mueva con la máxima seguridad posible. Por ejemplo, una de las dos pinzas siempre tiene que estar sujeta a la estructura metálica. La pinza se mantiene cerrada por el freno que tiene el motor y no requiere potencia eléctrica. El agarre de la pinza a la viga está planificado para asegurar una postura estable del robot. Una pinza no se abre hasta que este proceso comprueba que la otra está bien sujeta a la estructura.

5.7 Programas de búsqueda del mejor camino

Las tareas de inspección del robot tienen que abarcar toda la estructura metálica, por lo que se hace necesario planificar las trayectorias a seguir, teniendo en cuenta las siguientes especificaciones, [Balaguer, 99a]:

- Calcular el camino que recorre toda la estructura teniendo en cuenta el consumo de energía necesario
- Realizar la inspección de todas las caras de todas las vigas y columnas visitando todos los nodos y transiciones de la estructura.

El primer paso para resolver este problema es crear un mapa de navegación en forma de grafo, que servirá de espacio de búsqueda de los posteriores algoritmos de planificación. La construcción de este grafo se hace con la ayuda del módulo de programación, que aparece en la figura 5.10, y que forma parte de la interfaz de manejo del robot ROMA.

El trabajo relacionado con la planificación de movimientos en el nivel de tareas no ha sido uno de los objetivos de esta tesis. En Balaguer [Balaguer, 99a] se pueden ver todas las investigaciones relacionadas con la programación del robot en el nivel de tareas. En el trabajo mencionado cabe destacar la introducción de un nuevo concepto, la *planificación de movimientos orientada a habilidades*. Este concepto permite dividir el proceso de planificación en dos fases:

- Desarrollo de habilidades de movimiento, que se corresponden con los movimientos básicos mencionadas en el epígrafe 4.5.1.
- Planificación de movimientos en el nivel de tareas en función de las habilidades del robot ROMA.

Para modelar la estructura tridimensional se ha establecido un modo para caracterizar esta clase de entornos (estructuras de edificios, puentes, cubiertas metálicas, etc.) mediante

patrones denominados *elementos-tipo* (tubos o vigas con perfiles en doble T, I ó L) y *uniones-tipo* (crucetas tridimensionales de la estructura un edificio o la unión en forma de "X" en ciertos puentes). Estos patrones contemplan todos los elementos de una estructura y sus uniones de una manera eficiente, explotando la uniformidad inherente a esta clase de estructuras.

El modelo anterior, junto con otro modelo matemático que describe la navegación en estructuras tridimensionales teniendo en cuenta la optimización de cierto criterio, tiempo de navegación, energía consumida durante la navegación, etc. sirve para generar un mapa de navegación.

Los algoritmos de planificación son los encargados de realizar la búsqueda de la secuencia de movimientos óptimos en los mapas de navegación. Antes de elegir un algoritmo con el que trabajar, hay que identificar los tipos de planificación que se requieren para la navegación: la *planificación de caminos* (movimientos entre dos puntos de la estructura) y la *planificación de ciclos* (movimientos entre tres o más puntos de la estructura). Cada uno de los dos problemas está relacionado con la búsqueda de ciclos y caminos óptimos en grafos [McHugh, 90].

La planificación de caminos se asemeja a la búsqueda de un trayecto óptimo en un grafo y se resuelve empleando algoritmos ya clásicos como el de Dijkstra, el A* o la Búsqueda del Mejor Primero (BSF, Best First Search), que encuentren la trayectoria de mínimo consumo energético u otro criterio distinto para el robot entre los vértices correspondientes a los puntos de partida y de destino en la estructura tridimensional.

La planificación de ciclos en una estructura tridimensional se ha modelado con dos enfoques distintos:

- Modelado mediante el problema del viajante de comercio (*Travelling Salesman Problem*).
- Modelado mediante el problema del cartero rural (*Rural Postman Problem*).

En definitiva, con este trabajo se puede programar el robot con un alto grado de automatización y optimizar sus operaciones de inspección en un lenguaje en el nivel de tarea. Todo este trabajo está integrado en el entorno de programación desde donde se maneja el robot ROMA.

Identificación de robots escaladores

6

6.1 Introducción

Para poder realizar un buen control del sistema, es necesario tener la máxima información posible de las leyes que explican el comportamiento dinámico del sistema que se está estudiando. Pero no basta con eso, hay que saber cuál es el valor de los diversos parámetros que aparecen en dichas ecuaciones, como ocurre con los momentos de inercia de cada eslabón, o con el rozamiento viscoso de cada articulación. Para poder conocerlos con una mayor exactitud se recurre a las técnicas de identificación.

En la primera parte de este capítulo se explican las bases teóricas de las diferentes técnicas de identificación que se pueden aplicar en la identificación del comportamiento

dinámico de un robot escalador, partiendo del uso de dos modelos distintos: modelos calculados a partir de leyes físicas y modelos lineales estándares. También se presentan los procesos de validación de los modelos más utilizados que sirven para escoger los más apropiados. En último lugar se presentan los resultados del proceso de identificación de las diferentes articulaciones del robot con los dos modelos posibles.

6.2 Identificación de sistemas electromecánicos

El primer paso para poder hacer un control eficaz del sistema, es llegar a un buen conocimiento del comportamiento del mismo. Para encontrar diferentes modelos que representen el funcionamiento de cualquier sistema se recurre a las técnicas de identificación de sistemas. El modelo obtenido se usa habitualmente para realizar diferentes simulaciones en las que se puede predecir la conducta del robot bajo ciertas condiciones dadas, y como se expuso al principio, para el diseño de un control ajustado a las necesidades de la aplicación del robot. El modelo se obtiene siempre después de considerar ciertas simplificaciones sobre las propiedades más irrelevantes, o con muy poco peso sobre su comportamiento dinámico. Así se puede reducir la complejidad del modelo, sin perder generalidad, se disminuye el número de cálculos y el tiempo de simulación.

Cualquier proceso de construcción de un modelo implica la participación de tres entes fundamentales, según [Ljung, 95]:

- Un conjunto de modelos de datos que se adapten a la situación
- Los datos
- Un criterio de selección que permita ajustar los modelos utilizando los datos adquiridos

Durante la tarea de identificación el sistema se somete a diversas entradas y salidas que son recogidas y almacenadas, para tratarlas posteriormente. Los datos se recogen durante experimentos diseñados específicamente para la identificación, donde se elige que señales se

han de medir y en que momento. También es labor del investigador elegir la señal de entrada más adecuada para realizar este estudio. La selección de todos estos parámetros no se hace al azar, el investigador los elige a partir del conocimiento previo que se tiene del sistema, sus leyes físicas, que señales están accesibles para su medida, y cuál es el objetivo que se busca durante la identificación. El objetivo fundamental del diseño del experimento es la determinación de las entradas y las salidas (señales que se miden del proceso) de forma que los datos recogidos contengan la máxima información posible sobre el comportamiento dinámico del sistema.

Después de este paso hay que buscar un conjunto de modelos de entre los que se elegirá el que mejor se ajusta a los datos obtenidos. Este es la fase más importante y también la más difícil del proceso de identificación. En esta etapa, el conocimiento previo que se tenga del sistema y el análisis previo de los datos que se pueden obtener es de gran valía para escoger entre un modelo u otro. Hay dos caminos para la obtención de estos modelos:

- A partir de las leyes físicas que rigen el sistema.
- A partir de modelos lineales estándares, sin tener mucho en cuenta la física que gobierna el sistema.

El primer caso, se apoya en el conocimiento previo de las leyes físicas que explican el comportamiento dinámico del sistema, pero no se conocen los valores exactos de los parámetros de las ecuaciones. Esta clase de modelos se denomina cajas grises, y con ellos se consigue un modelado más preciso. En el caso de los sistemas electromecánicos es posible utilizar este tipo de modelos, que siempre ofrecen más garantías de representar la dinámica del sistema de una forma más realista, basándose en el estudio desarrollado en este capítulo de las leyes físicas que modelan estos sistemas. En el segundo caso, en el que no se repara en las leyes físicas se llaman modelos de cajas negras.

Para la determinación de los parámetros en un caso o en otro se acude a diversos métodos, de entre los que destacan los basados en el cálculo de mínimos cuadrados y sus

variantes, que realizan el proceso de identificación propiamente dicho, calculando los diferentes parámetros del modelo elegido.

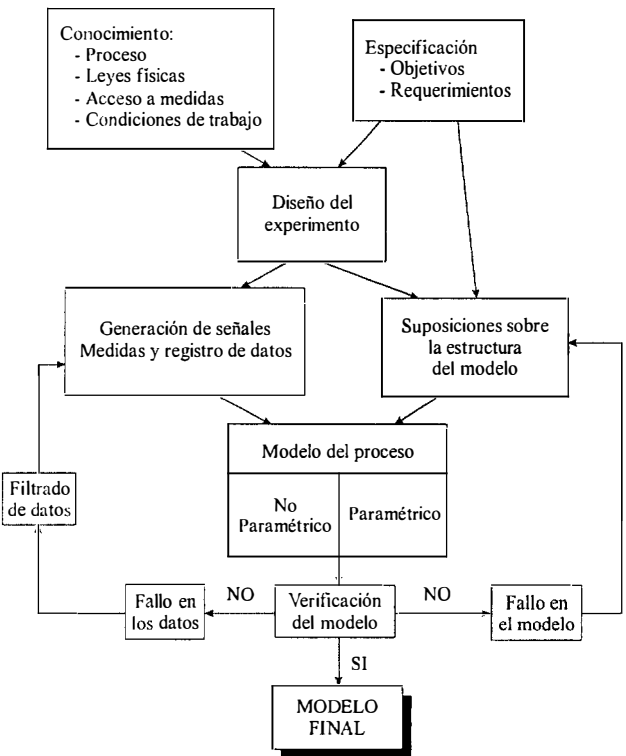


Figura 6.1 Ciclo del proceso de identificación

Una vez calculado el modelo que se ha elegido, y aplicado el método de identificación adecuado se debe comprobar la validez del modelo, es decir, si el modelo es bueno y sirve para su cometido, que es reflejar la dinámica del sistema. No hay que perder de vista que el objeto con el que se crea un modelo es para su utilización en la primera fase de diseño de los parámetros de control del sistema. Para la determinación de la validez del modelo se realizan diversas pruebas que constituyen el proceso de validación del modelo. Hay diferentes procedimientos para ver si el modelo seleccionado se ajusta a los datos obtenidos del sistema real. Un comportamiento deficiente llevará a su rechazo, y habrá que estudiar la causa del desajuste que podría ser por culpa de los datos o de la elección del modelo. Para solucionar este problema se pueden utilizar diferentes métodos de filtrado, en el caso de que el problema provenga de los datos, o se puede elegir un nuevo modelo, en el caso de que el elegido no se

ajustase. El ciclo completo del proceso de identificación, y la relación entre unas etapas y otras se puede ver en la figura 6.1.

A pesar de que el modelo pase todas estas pruebas establecidas, nunca podrá ser considerado como una descripción final y real del sistema. Lo único que será posible afirmar es que se dispone de una descripción lo suficientemente buena de ciertos aspectos del sistema que son de particular interés para el investigador, y para el diseño y desarrollo del control del sistema.

6.2.1 Modelos de identificación por el establecimiento de las leyes físicas

Una parte muy importante del desarrollo del modelo de un robot manipulador o de cualquier sistema dinámico es asegurar que su descripción matemática tenga un gran parecido con el comportamiento del sistema físico real. El modelo no tiene que ser una descripción matemática exacta del sistema físico, pero si una descripción que muestre la información que se quiere obtener del sistema.

6.2.1.1 Modelado de una articulación con un motor eléctrico

Como se mencionará en el siguiente capítulo, uno de los esquemas de control más empleado en la mayoría de los robots industriales comerciales, es aquel que trata a cada articulación como un servomecanismo independiente, sin tener en cuenta la influencia del resto de las articulaciones. En estos casos, es necesario desarrollar un modelo matemático de cada articulación que comprenderá al actuador, el reductor y la carga que mueva el robot, que en el caso del robot ROMA será la que produce el brazo que se mueve. Cada uno de los elementos aquí descritos ha sido visto con detenimiento en el capítulo 4. La ecuación que describe el comportamiento dinámico del sistema contiene diversos parámetros del motor, del reductor y de la articulación que son medibles directamente, tales como las masas, la constante de par del motor, o la relación de reducción del reductor, que pueden obtenerse de la información proporcionada por el fabricante. Por otro lado, las fricciones del motor y de la articulación son extremadamente difíciles de medir con precisión.

6.2.1.2 Ecuaciones eléctricas de un motor síncrono de imanes permanentes de campo alternativo

El modelo matemático que se desea obtener es el de un motor síncrono de imanes permanentes de campo alternativo, "*AC brushless*". Las ecuaciones no se diferencian en gran medida de las de un motor que tenga un entrehierro pequeño. Para que el manejo de las ecuaciones sea más sencillo, en este tipo de sistemas se suele hacer un cambio de variables con el que un sistema trifásico se transforma en un sistema bifásico, con coordenadas d y q , que giran solidariamente con el eje de giro del rotor. Para mantener las coordenadas anteriormente mencionadas según los ejes directo y en cuadratura con la referencia ligada al rotor es necesario conocer el ángulo del rotor θ_m en cada instante. Para obtener más información sobre el cambio de variables se puede consultar [Vas, 98]

$$\begin{aligned} V_d &= R_1 i_d + L_1 \frac{di_d}{dt} - \omega_m L_1 i_q + \omega_m \lambda_m \\ V_q &= R_1 i_q + L_1 \frac{di_q}{dt} + \omega_m L_1 i_d \end{aligned} \quad (6.1)$$

Normalmente, la corriente i_q se controla para que sea nula con lo que la ecuación que describe la variación de corriente i_d , que es la que pasa por el estator, es

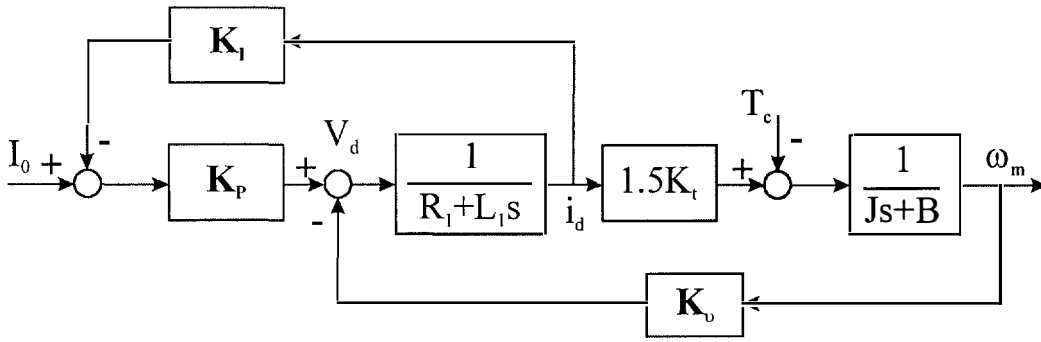
$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} i_d - \frac{\omega_m \lambda_m}{L_1} + \frac{V_d}{L_1} \quad (6.2)$$

y la expresión que relaciona el par que produce el motor, cuando se tiene en cuenta el rozamiento viscoso que existe en el eje de rotor es

$$J\dot{\omega}_m = -B\omega_m + 1.5K_t i_d - T_c \quad (6.3)$$

Si se introduce un control de realimentación en corriente, que es lo que hace el amplificador a la hora de controlar el motor, y con el cambio de variable $V_d = K_p(I_0 - K_t i_d)$ en la ecuación (6.2) y (6.3) el sistema queda escrito en variables de estado como

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1 + K_t K_p}{L_1} & -\frac{K_p}{L_1} \\ \frac{1.5K_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_p}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix} I_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} T_c \quad (6.4)$$

Figura 6.2 Regulación de un motor *AC brushless*

Si se supone que el par producido por la carga es cero, y se considera como señal de entrada la corriente I_0 , que será la amplitud de la corriente que pasa por las tres fases del estator, y como salida la velocidad del rotor, la función de transferencia queda

$$G(s) = \frac{K_p}{K_v} \frac{\frac{1.5K_t K_v}{JL_1}}{s^2 + \frac{R_1 + K_p K_i}{L_1} s + \frac{1.5K_t K_v}{JL_1}} \quad (6.5)$$

El conocimiento del orden del sistema del conjunto motor-amplificador será de gran utilidad a la hora de elegir el modelo de ecuaciones de identificación. Para obtener una información más detallada de las ecuaciones y de los pasos a seguir en el desarrollo de las siguientes ecuaciones se puede consultar [Dote, 90], y [Thomas, 99]

6.2.1.3 Par proporcionado por el motor

Asimismo, también se puede relacionar la tensión de entrada al amplificador con el par que proporciona el motor. En primer lugar, el par proporcionado por el motor tiene la expresión:

$$T(t) = \frac{3}{2} p [\lambda_m i_d(t) + i_d(t) i_q(t) (L_d - L_q)] \quad (6.6)$$

donde

λ_m es el flujo magnetizante del rotor

i_d es la corriente que pasa por el estator, después de haber hecho el cambio de variable del sistema trifásico a uno bifásico.

i_q es la corriente que pasa por el rotor

L_q es la inductancia magnética del rotor

L_d es la inductancia magnética del estator

Si el motor es simétrico en su construcción [Jahns, 94], las dos inductancias son iguales

$$T(t) = \frac{3}{2} p \lambda_m i_d(t) = k i_d(t) \quad (6.7)$$

donde k es la constante de par del motor e i_d la corriente que pasa por el estator.

En el caso del robot ROMA, el amplificador trabaja en modo corriente, lo que quiere decir que la señal de referencia (tensión) que recibe de la tarjeta controladora de ejes es una referencia de par que debe dar el motor. Así, la corriente que envía el amplificador al motor es proporcional a la señal de control. Por lo tanto la relación anterior se convierte en

$$T(t) = K u_c(t) \quad (6.8)$$

6.2.1.4 Pares de fricción

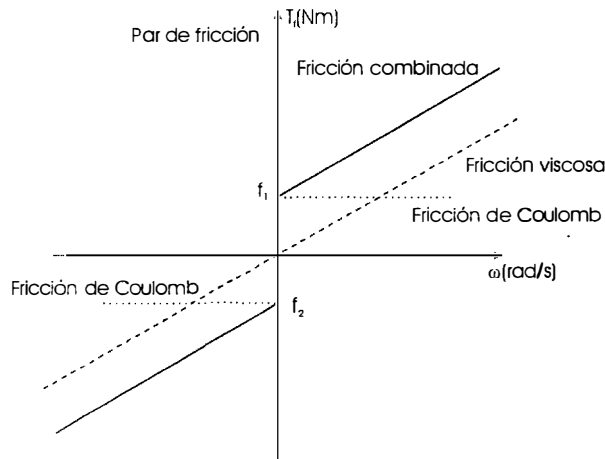


Figura 6.3 Modelo del par de fricción estática y viscosa

Los pares de fricción existentes son una combinación de los que se producen en el eje de la articulación y en el rotor del motor. Si la articulación presenta un reductor, la fricción de éste reductor también se combina con los dos anteriores. Aunque se han desarrollado diferentes

modelos de fricción que pueden ser ajustados y corregidos para cada caso [Abderrahim, 96], todos contienen una fricción viscosa lineal y una fricción estática no lineal. En esta tesis se ha considerado una versión simple del modelo de fricción [Armstrong-Hélouvry, 91] tal y como aparece en la figura 6.3 y en las ecuaciones posteriores.

$$T_f(t) = -B \frac{d\theta}{dt} f_1 \text{sign}(w(t) + |w(t)|) - f_2 \text{sign}(w(t) - |w(t)|) \quad (6.9)$$

donde $w(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$ siendo $\theta(t)$ la posición del eje de la articulación, o del motor.

6.2.1.5 Ecuación de un eje vertical de rotación

Suponiendo que la combinación de los momentos de inercia del motor y del eslabón del eslabón vista por el motor es J , entonces la ecuación del par dado es:

$$T(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} + f_1 \text{sign}(w(t) + |w(t)|) + f_2 \text{sign}(w(t) - |w(t)|) \quad (6.10)$$

6.2.1.6 Ecuación de un eje horizontal de rotación

El efecto de la gravedad ha sido incluido en la discusión de muchas publicaciones tales como [Arimoto, 96] con el fin de identificar su resultado dentro del modelo del sistema. En la práctica, la mayoría de los manipuladores existentes incluyen eslabones que giran sobre ejes horizontales, pero solo unos pocos tienen en cuenta la variación del par de la carga que proviene de los efectos gravitatorios.

Cuando el eje de rotación es horizontal la ecuación anterior se convierte en:

$$T(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} + Mgl \sin(\theta(t)) + f_1 \text{sign}(w(t) + |w(t)|) + f_2 \text{sign}(w(t) - |w(t)|) \quad (6.11)$$

donde M es la masa del eslabón y l es la distancia entre el eje de giro y el centro de gravedad del eslabón en un plano perpendicular al eje de rotación. Con la presencia de un reductor la función $\sin(\theta)$ se convierte en $\sin(\theta/n)$, donde n es el ratio de reducción.

Las ecuaciones (6.10) y (6.11) presentan diversos términos no lineales como son los que corresponden a la fricción estática y al par producido por el peso de la articulación. Hay que resaltar que en estos tres términos los valores de los coeficiente correspondientes f_1 , f_2 , y Mgl sí que son constantes, por lo que sí se puede aplicar cualquier método de identificación.

6.2.2 Modelos lineales estándares

El proceso de identificación con estos modelos se puede realizar en el dominio del tiempo si las señales de entrada son temporales, o en el dominio de la frecuencia si las señales de entrada son senoidales. En el caso del sistema que se quiere identificar en esta tesis se ha utilizado la primera, ya que en el régimen de funcionamiento normal del robot, es a éste tipo de señales a las que estará sometido el control del movimiento del robot.

Mediante este método el sistema viene representado por una función de transferencia, que describirá el comportamiento del sistema ante la variación de una entrada determinada. La ecuación general que representa el esquema general de cualquier sistema viene dado por la ecuación:

$$y(k) = G(z)u(k) + H(z)e(k) \quad (6.12)$$

donde

$y(k)$ representa la señal de salida del sistema.

$u(k)$ representa la señal de entrada.

$e(k)$ representa el ruido o perturbación que afecta al sistema.

$H(z)$ y $G(z)$ son funciones de transferencia que representan al sistema.

Las señales $y(z)$, $u(z)$, y $e(z)$ normalmente se obtienen con un sistema digital con lo que es lógico presuponer que a la hora de calcular las funciones de transferencia del sistema $H(z)$ y $G(z)$ sean discretas. No obstante también se pueden calcular sus equivalentes para un sistema continuo.

También es posible utilizar modelos basados en la representación en el espacio de estado en los que resulta más sencillo incorporar la representación de los mecanismos físicos del sistema que el caso de modelos clásicos con funciones de transferencia. En el caso de tener sistemas multivariantes y no lineales, con condiciones iniciales no nulas, este camino es mucho más fácil para obtener buenos resultados.

A la hora de realizar un proceso de identificación de un sistema es posible utilizar muchas representaciones distintas y se puede recurrir al uso de diferentes estructuras de funciones. En este epígrafe se realiza un breve desarrollo de las más utilizadas.

Sobre el proceso de identificación subyace por tanto la idea de obtener los parámetros que caracterizan a las funciones de transferencia que tratan de describir el sistema. Para conocer estos coeficientes se utilizan procesos de estimación. Esto supone que deben considerarse como parámetros a determinar durante el proceso de identificación. Es frecuente agrupar estos parámetros en un vector que se denominará θ . En este caso, la descripción del modelo queda:

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) \quad (6.13)$$

6.2.2.1 Modelo ARX

La manera más simple de describir una relación de entrada/salida es la siguiente ecuación en diferencias:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + e(t) \quad (6.14)$$

Como el término de ruido blanco entra directamente en la ecuación, también se le suele llamar a esta estructura *modelo de error de ecuación*. Los parámetros son en este caso

$$\theta = [a_1 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_m] \quad (6.15)$$

si se introducen los polinomios:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n} \\ B(q) &= 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m} \end{aligned} \quad (6.16)$$

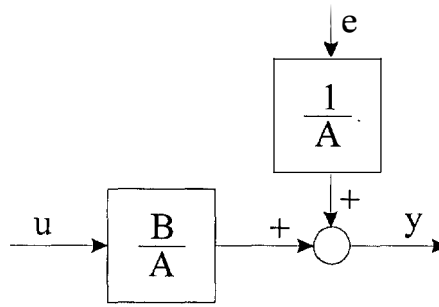


Figura 6.4 Modelo de identificación ARX

6.2.2.2 Modelo ARMAX

En el modelo anterior no hay mucha libertad a la hora de describir los efectos de las perturbaciones. El modelo ARX se puede modificar añadiendo un nuevo polinomio

$$C(q) = 1 + c_1 q^1 + \dots + c_k q^k \quad (6.17)$$

con lo que se obtiene la siguiente ecuación en diferencias

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_k e(t-k) \quad (6.18)$$

Las funciones de transferencia quedan

$$G(q|\theta) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad \text{y} \quad H(q|\theta) = \frac{C(q)}{A(q)} \quad (6.19)$$

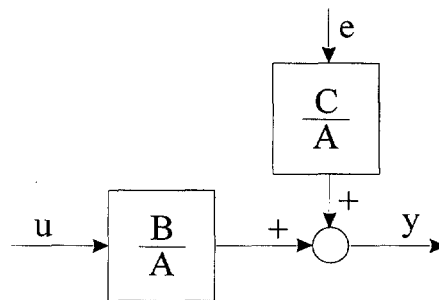


Figura 6.5 Modelo de identificación ARMAX

6.2.2.3 Modelo Error de salida

En las dos anteriores funciones de transferencia G y H tienen el mismo polinomio característico. Desde un punto de vista físico, parece más lógico pensar que las dos funciones de transferencia no tengan porqué tener el mismo comportamiento dinámico

Se supone que la relación entre la entrada y la salida sin perturbar se puede escribir como una ecuación en diferencias, y que las perturbaciones se deben a ruido blanco, con lo que se obtiene la siguiente descripción.

$$\begin{aligned} w(t) + a_1 w(t-1) + \dots + a_n w(t-n) &= b_1 u(t-1) + \dots b_m u(t-m) \\ y(t) &= w(t) + e(t) \end{aligned} \quad (6.20)$$

El modelo quedará

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t) + e(t) \quad (6.21)$$

El esquema de este modelo se muestra en la figura 6.6. Nótese que en este caso $H(q)=1$.

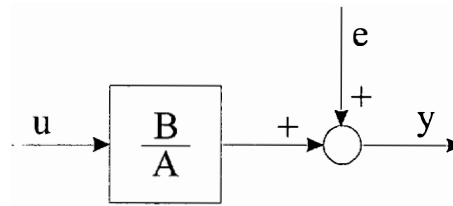


Figura 6.6 Modelo de identificación de error de salida

6.2.2.4 Modelo Box-Jenkins

Un desarrollo natural del modelo de Error de Salida es el descrito por la siguiente ecuación

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (6.22)$$

Es la descripción más general en la que las funciones G y H son parametrizadas independientemente. Se denomina realmente ARMA, aunque fue estudiado por Box y Jenkins en el año 1970. Su esquema es el mostrado en la figura 6.7.

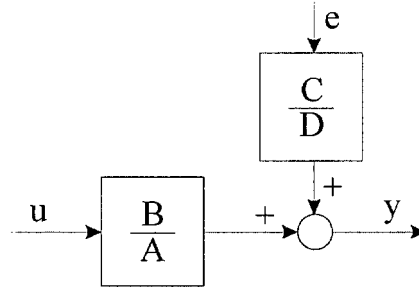


Figura 6.7 Modelo de identificación de Box-Jenkins

Una vez que se ha elegido el tipo de modelo que se usa para la identificación, hay que calcular los parámetros del modelo, el vector

$$\theta = [a_1 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_m \quad d_1 \quad \dots \quad d_m \quad c_1 \quad \dots \quad c_m]$$

en el caso del modelo Box-Jenkins. Cada uno de los elementos dará el valor de los coeficientes de los diferentes polinomios de las funciones de transferencia. Para elegir el orden de estos polinomios si es bueno tener en cuenta el orden de la función de transferencia, que se puede sacar de la ecuación (6.5).

6.2.2.5 Validación del modelo

Una vez elegido el modelo, hay que ver si se cumplen todas las hipótesis y simplificaciones que se hicieron cuando se seleccionó el modelo. Si éste no pasa los procesos de validación habrá que encontrar cuál es el fallo que se ha cometido, y filtrar los datos o elegir un modelo nuevo.

Existen varios métodos para comprobar si un modelo se adapta al comportamiento del sistema real. El uso de uno no excluye la utilización de otro, y de hecho, se suele usar más de uno durante este proceso:

- **Test de la función de coste.** La función de coste se considera como una función del periodo n del modelo $V(n)$. Se calcula el error cuadrático medio entre la señal real $y(t)$ y la estimada $\hat{y}(t)$, N el número de datos y d el número de parámetros. Los valores para V para el valor real de n y para valores superiores a n no deben diferir de forma significativa.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \theta) &= y(t) - \hat{y}(t, \theta) \\ V(n) &= f(d, N) \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \end{aligned} \quad (6.23)$$

Cuanto mayor sea el grado de n , la función de coste tiene un valor menor, por lo que se usan son diferentes tests estadísticos que indican si esa reducción es significativa:

- Test F, (test de la distribución F)
- Test AIC, (test de Akaike)
 - $f(d, N) = 1 + \frac{2d}{N}$
- Test FPE, (Error de predicción final)

$$\circ \quad f(d, N) = \frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}}$$

- **Cancelación de polos y ceros.** Si el resultado del modelo identificado es de mayor orden que el real, aparecerán n pares polo-cero, que se cancelan entre sí, hasta que el modelo sea del mismo orden que el real. Este método se aplica a los modelos lineales estándares.
- **Análisis de los residuos.** Si se ha hecho una buena estimación del sistema, los métodos que usan el error de predicción, necesitan que los residuos sean ruido blanco, con lo que se asegura que la estimación no está polarizada. Para analizar la presencia de este efecto se calcula la función de autocorrelación de los residuos. Si los residuos son residuo blanco, la función que se calcula tiene que ser aproximadamente cero en todos los puntos salvo en el origen.

- **Comparación entre la entrada y la salida.** Se hacen diversas comparaciones entre las salidas del sistema real y del modelo, con las entradas que se manejaron en la identificación y con otras distintas que no se usaron en el cálculo del modelo.

6.3 Identificación de los ejes del robot

Para la recogida de los datos necesarios en la identificación de los diferentes sistemas se utiliza la tarjeta controladora de ejes PMAC, que también forma parte de la arquitectura *hardware* de control del robot. Se pueden obtener datos de la señal de entrada, de la posición, velocidad y aceleración de cada eje tanto en bucle abierto como en bucle cerrado. Otro aspecto importante, es que también se puede decidir con que tiempo de muestreo se quiere trabajar, al igual que el número de muestras que se quieren tomar.

Los programas que se han usado durante la identificación son:

- Programas que trabajan en la tarjeta controladora de ejes adquiriendo datos de los diferentes ejes y encargados de crear las señales de entrada más adecuadas para cada método de identificación.
- La herramienta de identificación de sistemas del programa MATLAB [Ljung, 98] para el proceso de identificación y validación de los diferentes modelos. Se han desarrollado también diferentes programas, especialmente diseñados para la comparación entre los datos del sistema real y los del modelo.

Todos los ejes se han identificado en cadena abierta, usando señales de entrada escalón con amplitudes positivas y negativas de diferentes valores.

Los métodos de identificación que se han empleado en todos los ejes han sido los expuestos en el capítulo anterior:

- Modelos basados en las leyes físicas
- Modelos lineales estándares

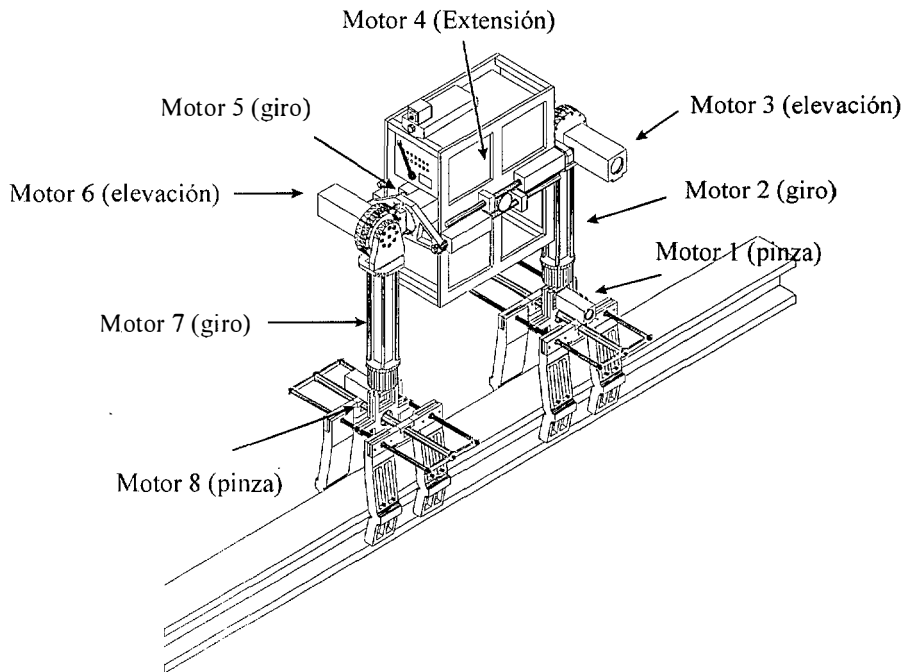


Figura 6.8 Disposición de los motores del robot ROMA

Para conocer mejor cuáles son los sistemas que se han identificado, se han numerado cada uno de los motores de las articulaciones y las dos pinzas. En la figura 6.8 aparecen los nombres de cada uno de ellos. Se puede apreciar que se pueden dividir en varios grupos según la clase de movimientos que permiten realizar en su correspondiente articulación:

- Apertura y cierre de las pinzas (Motor 1 y Motor 8)
- Giro de las pinzas o del cuerpo y el brazo opuesto (Motor 2 y Motor 7)
- Elevación de las pinzas o del cuerpo y del brazo opuesto (Motor 3 y Motor 6)
- Extensión del cuerpo (Motor 4)
- Giro de uno de los brazos (Motor 5)

Los modelos basados en las leyes físicas, se han establecido usando la ecuación (6.10) para los motores que no tienen involucrado en su movimiento el par producido por la gravedad (motores 1, 2, 4, 7, 8), y la (6.11) por los que sí la tienen (motores 3, 5, y 6). El motor 4, en un principio, se calculó teniendo en cuenta los efectos gravitatorios, colocando el cuerpo inclinado

y en vertical, pero se comprobó que su contribución era casi nula. La causa está en la alta reducción del engranaje helicoidal que lleva y su alta irreversibilidad.

Los valores que se pueden medir de estas ecuaciones son: la posición, velocidad y aceleración del eje. El término $\text{sen}(\theta)$ se calcula fácilmente a partir de la posición θ del eje, y las funciones $\text{sign}(w(t) + |w(t)|)$ y $\text{sign}(w(t) - |w(t)|)$ a partir de los datos de la velocidad. El par proporcionado por el motor, se calcula multiplicando el valor de la señal de referencia que se le envía al amplificador por la constante de par de cada motor, y por la ganancia del amplificador en modo corriente.

Las señales de entrada que se han utilizado han sido trenes de pulsos de amplitud positiva y negativa. Esta amplitud es distinta, dependiendo del sentido de giro, en los motores 3, 5, y 6. En los que no están afectados por la gravedad, la amplitud es la misma en un sentido que en otro. El uso de transiciones de valores positivos a negativos, y viceversa, permite conocer con mayor exactitud los coeficientes de fricción estática.

Con los datos medidos, y usando el método de mínimos cuadrados se pueden calcular los distintos coeficientes de las ecuaciones:

- J (Inercia de la carga que se va a mover)
- B (fricción viscosa)
- Mgl (Par máximo producido por la carga que mueve el sistema). Solo en los ejes afectados por la gravedad
- f_1 (fricción estática positiva)
- f_2 (fricción estática negativa)

La tablas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 muestran los valores obtenidos de los anteriores parámetros para los 8 motores del robot. Se ha considerado que los motores 1 y 8 tienen una misma respuesta, ya que son motores iguales y la carga que mueven es la misma. Con los motores 2 y 7, y los motores 3 y 6 ocurre exactamente lo mismo.

Para los motores 1 y 8 los valores calculados para diferentes tensiones de entrada de referencia son

Tensión (V)	J (kg·m ²)	B (N·m·s/rad)	f ₁ (N·m)	f ₂ (N·m)
±1.5	0.87064·10 ⁻⁵	1.7943·10 ⁻⁴	0.2758	0.3035
±2	1.0677·10 ⁻⁵	2.6216·10 ⁻⁴	0.3187	0.3681
±3	1.0979·10 ⁻⁵	8.6067·10 ⁻⁴	0.2828	0.3359
±3.5	1.3640·10 ⁻⁵	1.3276·10 ⁻⁵	0.2073	0.2697

Tabla 6.1 Coeficientes del motor 1

Para los motores 2 y 7 los valores son:

Tensión (V)	J (kg·m ²)	B (N·m·s/rad)	f ₁ (N·m)	f ₂ (N·m)
±0.6	1.5894·10 ⁻⁶	2.1·10 ⁻⁵	0.2346	0.2391
±0.8	1.6263·10 ⁻⁶	1.2·10 ⁻⁵	0.2929	0.3089
±1	1.1934·10 ⁻⁵	1.4826·10 ⁻⁴	0.6056	0.6227
±1.2	2.0721·10 ⁻⁵	2.2218·10 ⁻⁴	0.6932	0.7079

Tabla 6.2 Coeficientes del motor 2

Para el motor 4 los valores son:

Tensión (V)	J (kg·m ²)	B (N·m·s/rad)	f ₁ (N·m)	f ₂ (N·m)
±5	1.8152·10 ⁻⁵	3.8699·10 ⁻⁴	0.4071	0.3870
±6	2.7625·10 ⁻⁵	1.2207·10 ⁻⁵	0.1973	0.1809
±7	2.7044·10 ⁻⁵	1.5197·10 ⁻⁵	0.1773	0.1645

Tabla 6.3 Coeficientes del motor 4

Dentro de los motores que a los que les afecta la gravedad, los valores obtenidos para los motores 3 y 6 son:

Tensión (V)	J (kg·m ²)	B (N·m·s/rad)	Mgl (N·m)	f ₁ (N·m)	f ₂ (N·m)
1.5; -1	3.6351·10 ⁻⁴	3.0195·10 ⁻³	0.44278	0.26087	0.9932
2; -1	1.9533·10 ⁻⁴	1.4765·10 ⁻³	0.23906	0.35393	0.79017
2.5; -1	1.8251·10 ⁻⁴	9.5159·10 ⁻⁴	0.18234	0.37399	1.0579
3; -1	2.3273·10 ⁻⁴	1.1660·10 ⁻³	0.20615	0.34049	1.1515

Tabla 6.4 Coeficientes del motor 3

En el motor 5 los valores son:

Tensión (V)	J (kg·m ²)	B (N·m·s/rad)	Mgl (N·m)	f ₁ (N·m)	f ₂ (N·m)
±0.6	2.2635·10 ⁻⁵	1.3344·10 ⁻³	-0.3251	0.21895	0.10771
±0.8	3.5032·10 ⁻⁵	2.5859·10 ⁻³	0.8646	0.24075	0.20479
±1	5.7736·10 ⁻⁵	1.0564·10 ⁻³	-0.1338	0.37399	1.0579
±1.2	5.9267·10 ⁻⁵	1.3380·10 ⁻³	-0.3541	0.34049	1.1515

Tabla 6.5 Coeficientes del motor 5

Para comprobar la validez de los modelos obtenidos se muestran diferentes gráficas donde se compara la señal real del sistema con la que proporciona el modelo obtenido. En ellas se puede ver claramente que los modelos obtenidos representan con gran fidelidad el comportamiento del sistema real.

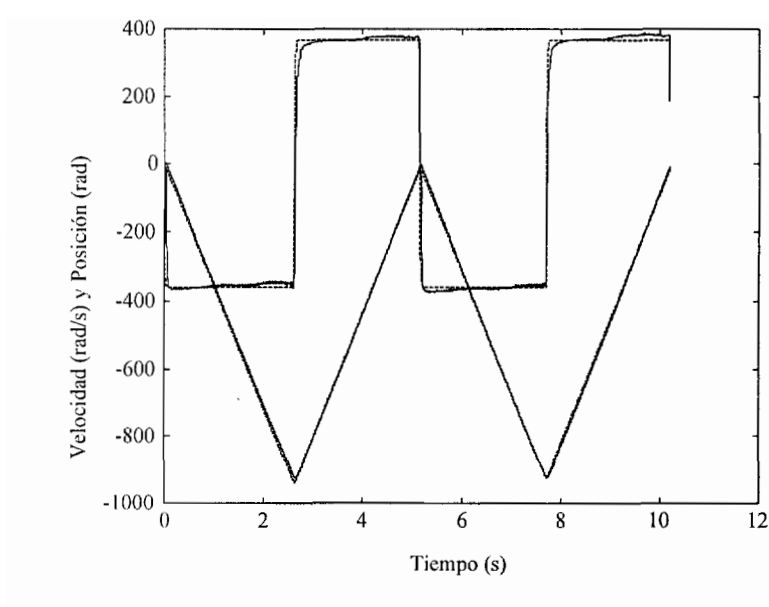


Figura 6.9 Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 1

Con un simple análisis de las gráficas, se puede apreciar que los sistemas que tienen elementos de transmisión con reductores con engranajes y husillo, poseen un alto grado de fricción. Los ejes que tienen reductores Harmonic-Drive tienen mucha menos fricción que los otros. Además, se observa claramente que los ejes que tienen que levantar y bajar cargas poseen respuestas muy distintas en un sentido que en otro. En las gráficas se aprecia claramente que la velocidad no consigue llegar al régimen permanente.

La figura 6.9 muestra la señal del motor 1 comparando la señal de velocidad y posición entre la real y la modelada con un tren de pulsos entre +2 V y -2 V.

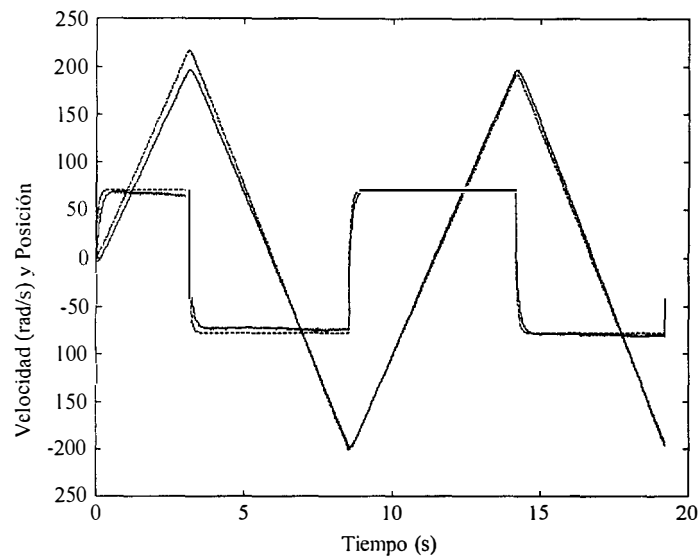


Figura 6.10 Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 2

La figura 6.10 muestra la señal del motor 2 comparando la señal de velocidad y posición entre la real y la modelada con un tren de pulsos entre +1 V y -1 V.

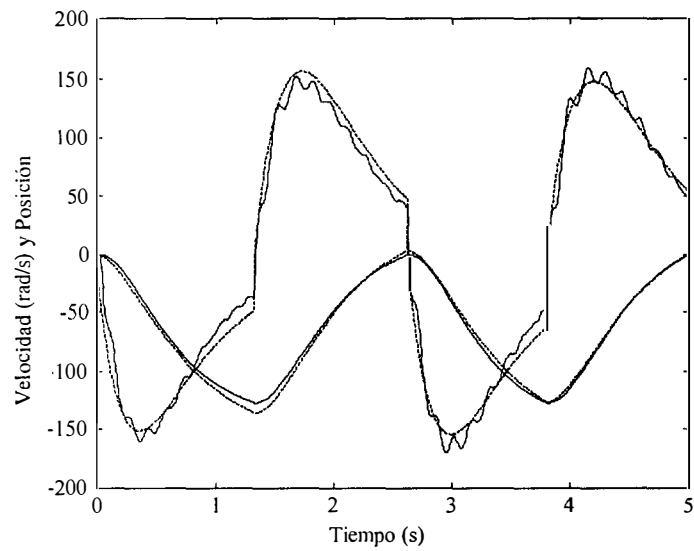


Figura 6.11 Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 3

La figura 6.11 muestra la señal del motor 3 comparando la señal de velocidad y posición entre la real y la modelada con un tren de pulsos entre 2.5 V y -1 V.

La figura 6.12 muestra la señal del motor 4 comparando la señal de velocidad y posición entre la real y la modelada con un tren de pulsos entre +6 V y -6 V.

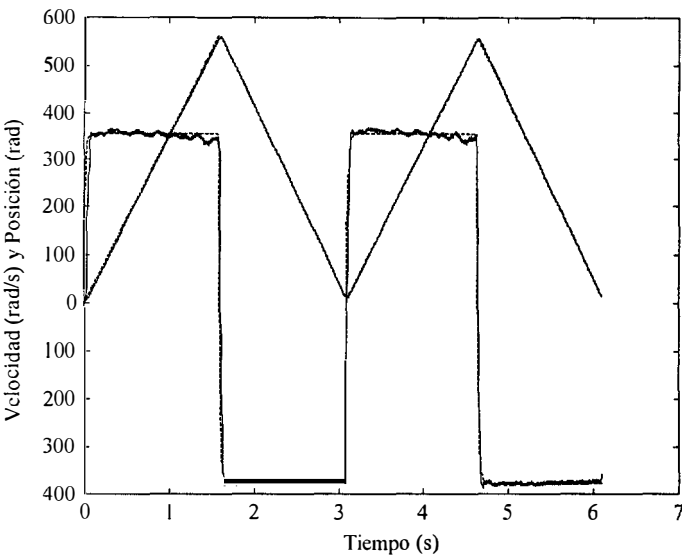


Figura 6.12 Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 4

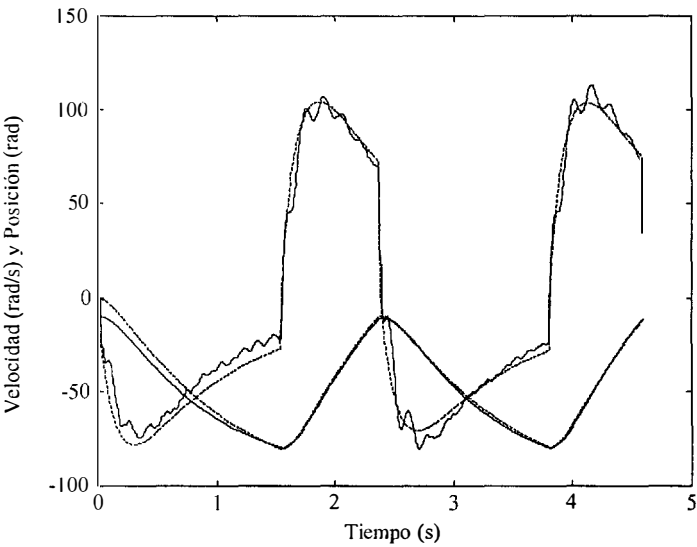


Figura 6.13 Posición y velocidad del sistema real y modelado del motor 5

La figura 6.13 muestra la señal del motor 5 comparando la señal de velocidad y posición entre la real y la modelada.

Las articulaciones que realizan movimientos no afectados por la gravedad se han identificado también usando los modelos lineales estándares, expuestos en el epígrafe 6.2, de entre los que mejor resultado proporcionan son los modelos ARX y el Error de Salida. El modelo que se busca es el que corresponde con la ecuación (6.17) donde la señal $y(t)$ es la velocidad del eje del motor, y la señal $u(t)$ la tensión de referencia que va desde la tarjeta de control de ejes al amplificador. La función de transferencia tiene un cero y dos polos.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (6.17)$$

El sistema que se usa en el cálculo del control, es el anterior, pero con una modificación, la variable que se quiere controlar es la posición, principalmente, por lo que se integra la ecuación (6.17), que en el dominio de Laplace se consigue multiplicando por $1/s$. Sin embargo, es más fácil identificar con los datos de velocidad que con los de posición. En todos los modelos se lee la tensión de entrada al amplificador, y la velocidad. Hay que recordar que el amplificador solo añade una ganancia constante al sistema, al trabajar en modo corriente.

	Método ARX					Método OE				
Entrada (V)	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
0.35	1.64	1.24	1	0.993	0.042	36.94	19.36	1	38.55	0.610
0.5	3.52	1.63	1	0.598	0.026	-253.5	75.80	1	42.16	1.173
1	7.68	4.37	1	0.871	0.150	-432.8	126.9	1	38.03	4.160
1.5	2.87	1.47	1	0.720	0.071	-837.9	236.2	1	73.62	11.18
2	2.20	1.28	1	0.810	0.079	-375.8	86.93	1	39.05	5.320
2.5	6.33	4.88	1	1.311	0.382	-270.5	94.3	1	37.87	7.220
3	3.68	2.52	1	1.090	0.230	-196.7	65.46	1	37.65	5.924
3.5	3.31	2.52	1	1.191	0.263	-206.9	59.68	1	40.43	6.153
4	2.09	1.46	1	1.050	0.174	-170.9	46	1	38.94	5.370
4.5	2.09	1.51	1	1.090	0.201	-185.3	54	1	41.66	7.084
5	2.98	2.45	1	1.340	0.361	-119.8	44.85	1	38.55	6.471

Tabla 6.6 Identificación por el método ARX y OE con pinza abriendo

La tablas 6.6, y 6.7 muestran los resultados obtenidos con el uso de modelo ARX y OE para los motores 1 y 8 que son los que abren y cierran las pinzas

Entrada (V)	Método ARX					Método OE				
	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
0.35	5.31	4.06	1	1.023	0.063	313.9	55.27	1	41.25	0.815
0.5	1.93	1.05	1	0.692	0.018	-438.2	80.60	1	37.89	1.419
1	2.76	2.57	1	1.251	0.085	-386.2	136.7	1	38.17	4.585
1.5	2.78	1.54	1	0.774	0.075	-302.7	144.2	1	37.60	70.99
2	2.78	1.70	1	0.880	0.110	-434.0	166.9	1	74.36	10.81
2.5	1.33	3.49	1	1.564	0.280	-230.9	149.7	1	38.96	12.03
3	0.72	1.71	1	0.979	0.161	-177.6	104.1	1	38.37	9.818
3.5	0.94	2.30	1	1.221	0.249	-500.1	350.7	1	113.9	38.03
4	0.664	1.57	1	1.024	0.194	-150.3	92.56	1	39.63	11.39
4.5	0.989	2.61	1	1.644	0.361	-140.5	103.2	1	38.53	14.23
5	1.79	4.22	1	2.98	0.646	-136.9	100.9	1	38.91	15.45

Tabla 6.7 Identificación por el método ARX con pinza cerrando

La tablas 6.8, y 6.9 muestran los resultados obtenidos con el uso de modelo ARX y OE para los motores 2 y 7 que son los que hacen girar las pinzas del robot. El valor de las tensiones de entrada que necesitan estos motores es mucho menor que en el caso de los anteriores puesto que estos motores tienen una mayor ganancia. Hay que indicar que los resultados obtenidos con el modelo ARX se ajustan mejor a los valores reales de cada uno de los motores, que los conseguidos con el modelo OE.

Entrada (V)	Método ARX					Método OE				
	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
-0.2	0.845	0.779	1	1.2086	0.0438	-15.51	23.47	1	37.25	1.319
-0.25	1.023	1.08	1	1.3866	0.0423	-73.72	30.21	1	34.54	1.170
-0.3	0.802	0.848	1	1.3683	0.0270	-11.08	24.71	1	37.76	0.791
-0.35	0.783	0.723	1	1.1939	0.0201	97.27	19.77	1	37.09	0.547
-0.4	0.877	0.648	1	0.9450	0.0127	106.1	27.23	1	41.84	0.535
-0.45	0.701	0.503	1	0.9129	0.0083	119.6	27.13	1	50.54	0.456
-0.5	0.903	0.945	1	1.3451	0.0118	168.5	22.60	1	36.52	0.278

Tabla 6.8 Identificación del motor 2 con el método ARX y OE

Entrada (V)	Método ARX					Método OE				
	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
0.2	0.656	0.383	1	0.7547	0.0824	-19.61	19.78	1	37.10	1.461
0.25	0.552	0.374	1	0.8727	0.0232	80.06	27.11	1	5.566	0.168
0.3	0.738	0.433	1	0.7450	0.0169	-17.29	23.11	1	37.09	0.902
0.35	0.689	0.582	1	1.0912	0.0204	-29.55	29.27	1	52.47	1.029
0.4	0.807	0.737	1	1.1783	0.0172	61.77	21.96	1	36.92	0.512
0.45	0.663	0.336	1	0.6266	0.0068	121.3	25.23	1	50.90	0.505
0.5	0.853	0.599	1	0.8929	0.0096	108.2	29.32	1	44.61	0.483

Tabla 6.9 Identificación del motor 2 con el método ARX y OE

A la hora de aplicar los modelos lineales a los motores 3, 5 y 6, fijándose en las figuras 6.11 y 6.13, se ve que esta señal no es la más ideal para usar esta clase de métodos, ya que en ningún instante llega a su régimen permanente, y probablemente los parámetros que se obtendrían aplicando este método a cualquier modelo lineal serían erróneos y no pasarían la fase de validación.

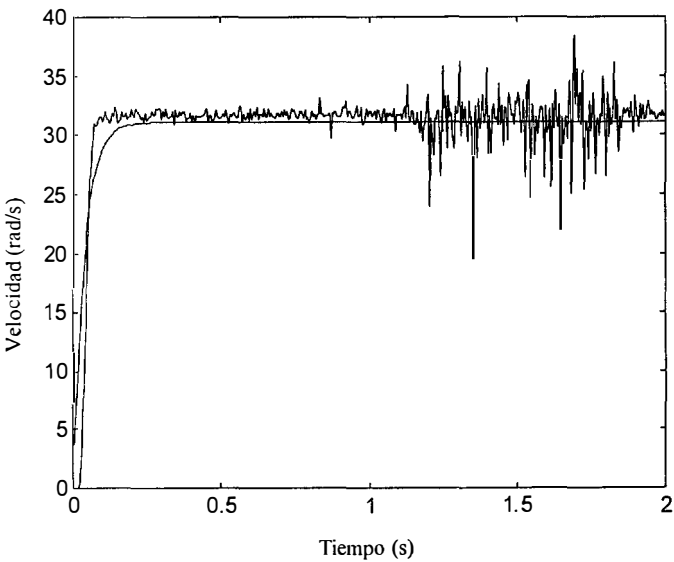


Figura 6.14 Velocidad del sistema real y modelado del motor 1 abriendo la pinza

Las gráficas 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17 muestran la comparación del modelo con la señal del sistema real, donde se comprueba la calidad del modelo obtenido. En estas gráficas se



puede observar la validez de las funciones de transferencia del modelo que se ha escogido. La gráfica 6.14 muestra al motor 1 abriendo la pinza cuando la entrada es una señal escalón de 1.5 V, y la gráfica 6.15 muestra al motor 1 cerrando la pinza cuando la entrada es una señal escalón de -1.5 V

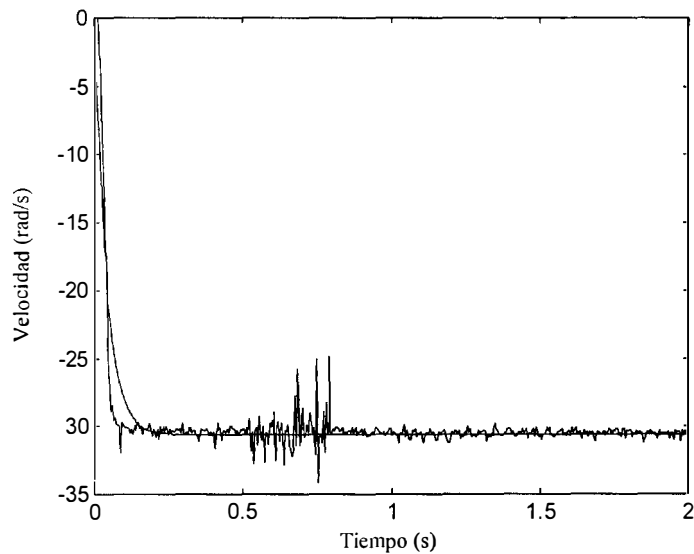


Figura 6.15 Velocidad del sistema real y modelado del motor 1 cerrando la pinza

La respuesta del motor 2 ante una señal de un escalón positivo aparece en la gráfica 6.16.

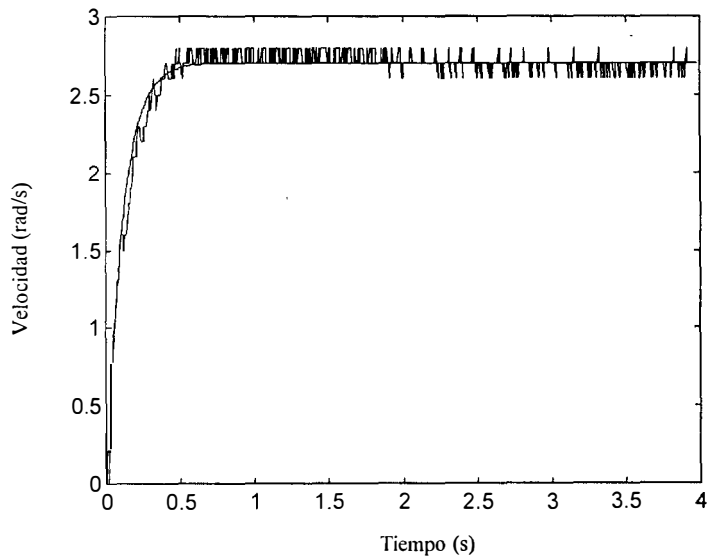


Figura 6.16 Velocidad del sistema real y modelado del motor 2 con un escalón positivo

La gráfica 6.17 muestra la respuesta ante un escalón que produce un giro negativo del motor 2:

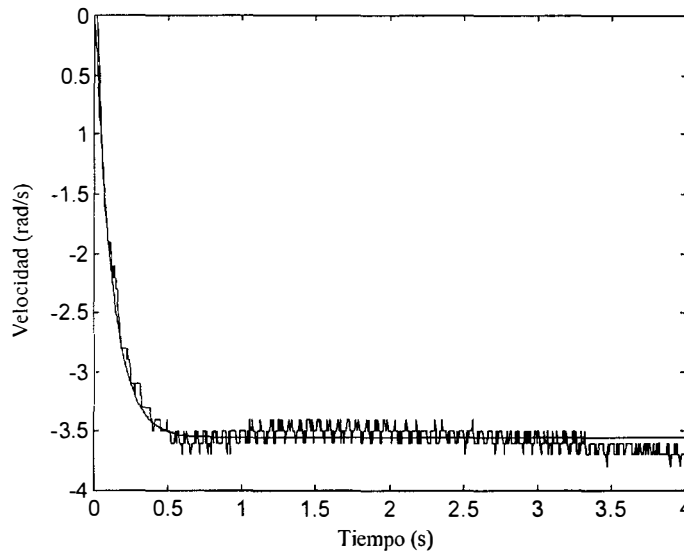


Figura 6.17 Velocidad del sistema real y modelado del motor 2 con un escalón negativo

Con todos los sistemas identificados hasta ahora, hay que elegir cuáles son los que mejor se ajustan al comportamiento del sistema. A partir de las diferentes pruebas que se han realizado, comparando la respuesta entre la salida del modelo y del modelo real, la función de pérdida y la de coste, se ha llegado a la conclusión de que los que mejor se adaptan son los modelos creados con las leyes físicas y los calculados con el modelo ARX.

Por tanto, los modelos escogidos para el posterior estudio del robot ROMA para cada eje han sido las leyes físicas y los modelos ARX calculados con la corriente de entrada en los rangos de funcionamiento nominal de los motores en cualquier movimiento. Hay que notar que no se ha realizado la identificación del motor 3 y 6 cuando levantan a la vez el cuerpo y el brazo opuesto correspondiente. Si estos motores se mueven en cadena abierta, no se puede asegurar que el robot salga dañado al chocar con la viga o una columna, con lo que el cálculo de los reguladores en esta clase de movimiento se hizo directamente, colocando las ganancias del regulador con valores proporcionales a los que se han obtenido cuando los motores mueven solamente el brazo.

Control de robots escaladores

7

7.1 Introducción.

Para que el robot se mueva adecuadamente por un entorno tan complejo como el que se ha planteado en los capítulos anteriores, es necesario que tenga un buen diseño mecánico y cinemático, ya que sin esto no podrá soportar todos los esfuerzos a los que se encuentre sometido en cualquier instante, ni tendrá un alto grado de accesibilidad a cualquier punto de la estructura. No obstante, también es necesario que exista un buen control de todos los movimientos que haga el robot para sacar un mayor provecho de la mecánica y los actuadores que posee. Este es un asunto bastante importante ya que el diseño del par de los motores está muy ajustado al que se necesita (deben ser lo menos pesados posible), y las fuerzas de gravedad que inciden en cada articulación tienen un valor muy alto respecto de los otros pares

que aparecen. Por las características del robot, cada motor trabajará con cargas variables, ya que si sube o baja actuará a favor o en contra de la gravedad, pero además puede mover un brazo o el resto del cuerpo (articulaciones de elevación y giro).

Hasta ahora todos los estudios que se han hecho sobre el control de robots caminantes o escaladores, estaban dirigidos hacia dos campos distintos: unos dedicados al control y planificación de la secuencia de movimientos de sus patas, lo que se conoce como control del paso (*gait*). Otros investigadores se han dedicado al control del agarre y de la seguridad para que el robot no se caiga mientras está escalando. Sin embargo, no hay demasiados trabajos sobre el control de posición de cada articulación para mejorar la calidad de movimiento, y a la larga en la mejora del control del paso. Recientemente se pueden destacar los trabajos de [Akinfiev, 99], de [Randall, 99] y [Pratt, 99] aplicados a robots caminantes y de [Balaguer, 99b] en robots escaladores.

En este capítulo se propone la implementación de un control adaptativo por planificación de ganancias en función de la gravedad para gobernar la posición de las diferentes articulaciones del robot ROMA. La gravedad, aunque es el elemento no lineal más importante en el caso de un robot escalador, no es el único que se busca controlar, porque también se persigue eliminar los efectos causados por la fricción de los conjuntos motor-reductor, y las saturaciones de los elementos electrónicos. El control adaptativo no es la única ley que permite regular el comportamiento dinámico de este robot, pero si es la más sencilla y la más rápida de implementar. Con el control adaptativo se asegura una buena maniobrabilidad del robot. Por último, se muestran los resultados comparativos del sistema de control implantado en el robot escalador.

En la primera parte de este capítulo se presentan los principales esquemas de control que se usan en los robots tradicionales, y cuáles son los problemas que se resuelven con la implementación de cada uno de ellos. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo de control propuesto en esta tesis.

7.2 Control de robots

A un robot se le exige que tenga un buen comportamiento dinámico. Actualmente la utilización de materiales más ligeros, transmisiones con mayor eficiencia y menor holgura, actuadores más ligeros y más rápidos, y sensores con una elevada resolución, han permitido que la mecánica del brazo mejore sensiblemente. No obstante, si no se implementa un buen control en el robot, no se tendrá una buena respuesta dinámica.

Un robot tiene una buena respuesta dinámica cuando el control es capaz de sacarle todo el partido a los elementos mecánicos del brazo. Es decir, el manipulador se puede mover con las velocidades y aceleraciones que le exija el controlador y la mecánica sea capaz de soportar. Así mismo, los movimientos deben tener la máxima precisión posible que permitan los sensores y la mecánica. No hay que buscar una precisión alta solamente en la posición final de un movimiento, sino a lo largo de toda la trayectoria deseada por el usuario, $q_d(t)$, para que sea lo más parecida a la posición real del robot $q(t)$. La diferencia de estas dos señales se conoce como señal de error, y en robótica se le denomina error de seguimiento. El principal objetivo del control dinámico es hacer que el error de seguimiento sea nulo.

Lo primero que se debe hacer es conocer el modelo dinámico del robot, que por lo general es no lineal, multivariable, acoplado y con parámetros variables, lo que revela que las ecuaciones son bastante complicadas. Para calcular el modelo dinámico se aplican los métodos de identificación vistos en la primera parte de este capítulo.

Seguidamente, a partir de estos modelos dinámicos hay que determinar las leyes y estrategias de control para que el robot tenga el comportamiento dinámico que desea su diseñador. Dependiendo de la complejidad que pueda tener el control se pueden dividir en dos grandes campos: el control monoarticular, en el que no se tiene en cuenta la interacción que puede haber entre las diferentes articulaciones del robot, y el control multiarticular, en el que se contempla al robot como un sistema multivariable donde cada articulación está afectada por las

características dinámicas de las demás (apareciendo en el par de perturbación de cada una de ellas).

Es importante recordar, que el robot ROMA tiene un solo amplificador, por razones de peso, y por tanto nunca se podrán mover todos los motores a la vez; sólo se moverá uno. Lo que sí ocurrirá es que éste tendrá que mover diferentes pares de carga dependiendo de la posición que tengan las otras articulaciones. Por esto, es necesario conocer la cinemática directa del robot ROMA respecto de su punto de agarre en cada momento.

7.2.1 Control monoarticular

El accionamiento más usado en los robots es el motor eléctrico, debido a su mayor facilidad para controlar su posición, velocidad y aceleración. Por tanto, el estudio se hará suponiendo con un accionamiento de esta clase. A la hora de demostrar las ecuaciones de movimiento de una articulación del robot se van a hacer varias hipótesis para que el seguimiento de los cálculos sea más sencillo:

- El factor de reducción de los reductores o transmisores de movimiento que puedan tener los motores se va a considerar igual a 1.
- La ganancia del amplificador del sistema es igual a 1.
- El par que produce el motor es proporcional a la entrada de tensión al motor, por lo que esta constante también vale 1.

– La consideración de estas simplificaciones no hace perder generalidad a las conclusiones que se saquen del estudio de aquí en adelante. El suponer que estas ganancias valen la unidad ayuda a reducir la complejidad de las ecuaciones que reflejan el comportamiento dinámico de los diferentes eslabones del robot, pero en ningún caso afectan a la exposición de los algoritmos de control que se exponen a continuación.

7.2.1.1 Control PD

Este regulador tiene un uso muy extendido en la mayor parte de los robots industriales comerciales. En el sistema de la figura 7.1, lo único que falta por modelar, es el comportamiento de la carga, que por facilidad se supone que solo existe rozamiento viscoso y el momento de inercia del brazo. El resto de pares que pueden aparecer se consideran dentro de un par perturbador τ_p . Este es el algoritmo de control más sencillo que se puede implementar. Su ley de control es:

$$u = -k_v \dot{q} + k_p (q_d - q) \quad (7.1)$$

donde la señal de error vale $e = q_d - q$

q es la posición real de la articulación

q_d es la posición deseada para la articulación

\dot{q} es la velocidad de la articulación

K_p , y K_v son dos constantes positivas y mayores que cero.

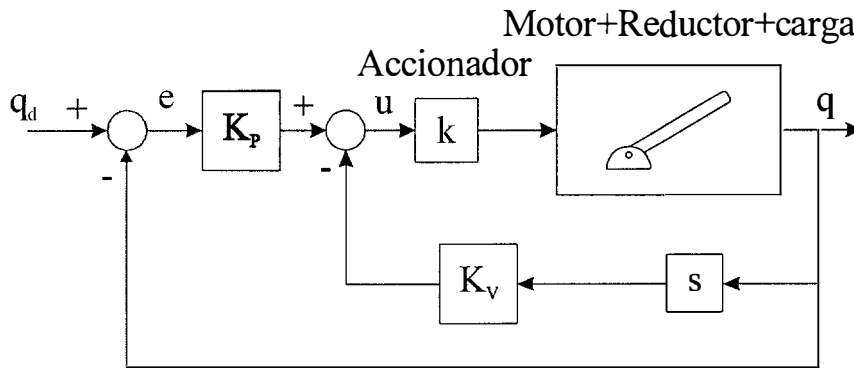


Figura 7.1 Control PD monoarticular

Si se suma a cada miembro de la ecuación (7.1) el término $-K_v s q_d$, y teniendo en cuenta que la señal de error es igual a la diferencia entre la posición deseada y la posición real $e = q_d - q$, la ecuación de control queda

$$u + k_v s q_d = (k_p + s k_v) e \quad (7.2)$$

$$\tau = \tau_p + (Js + B)sq \quad (7.3)$$

si $\tau = u$, es decir, la señal de control es igual al par que se debe aplicar, entonces,

$$\tau_p + (Js + B)sq_d + k_v sq_d = (k_p + sk_v)e \quad (7.4)$$

sumando a cada miembro el término $(Js + B)sq_d$ y operando la ecuación queda

$$\tau_p + (Js + B)sq_d + k_v sq_d = (k_p + sk_v)e + (Js + B)se \quad (7.5)$$

con lo que la señal de error es

$$e = \frac{\tau_p + (Js + B + k_v)sq_d}{(k_p + sk_v) + (Js + B)s} \quad (7.6)$$

Para comprobar si el sistema es estable ante cualquier entrada de posición, se calcula la función de transferencia entre la posición deseada y la actual, haciendo nula la perturbación. Sabiendo que, $e = q_d - q$, y con la ecuación anterior

$$q_d - q = \frac{(Js + B + k_v)sq_d}{(k_p + sk_v) + (Js + B)s} \text{ sacando factor común } q_d \text{ queda}$$

$$q_d \left(1 - \frac{(Js + B + k_v)s}{(k_p + sk_v) + (Js + B)s} \right) = q \text{ y la función de transferencia es}$$

$$\frac{q}{q_d} = \frac{k_p}{(k_p + sk_v) + (Js + B)s} = \frac{k_p}{Js^2 + (k_v + B)s + k_p} \quad (7.7)$$

Aplicando el criterio de Routh [Puente, 90] al polinomio característico de la anterior función de transferencia, las condiciones para que el sistema sea estable son:

$$\begin{aligned} J &> 0 \\ k_v > 0 \quad k_p &> 0 \\ k_v + B &> 0 \end{aligned} \quad (7.8)$$

El momento de inercia siempre es positivo, las ganancias del amplificador se han definido siempre positivas, y el coeficiente del rozamiento viscoso siempre es positivo.

Ante una señal escalón en la entrada q_d , en régimen permanente, la posición final de la articulación será igual a la deseada, $q_d = q$, aunque durante el régimen transitorio, debido a la forma de la función de transferencia la señal de error no será nula. Si la entrada de la

posición deseada q_d no varia, y el par de perturbación tiene una entrada escalón, se puede calcular el error en régimen permanente aplicando el teorema del valor final

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\frac{1}{s}}{(k_p + s k_v) + (Js + B)s} = \frac{1}{k_p} \quad (7.9)$$

con lo que se aprecia que el error en régimen permanente ante una perturbación se mantiene constante, y será menor cuanto mayor sea la ganancia proporcional del regulador, aunque nunca se anula. Si se aumenta la ganancia proporcional se puede reducir este error, pero los ruidos medidos y la dinámica sin modelar limitan el uso de ganancias muy altas en la práctica (saturaciones, tableteos, etc.).

7.2.1.2 Control PID

Para tratar de resolver el problema anterior se acude a un control PID realimentado. Este controlador también tiene un uso muy extendido entre los robots industriales de mayor uso. La ley de control de un regulador PID es

$$u = -k_v \dot{q} + k_p (q_d - q) + k_i \int_0^t (q_d - q) dt \quad (7.10)$$

donde al igual que antes q es la posición, \dot{q} la velocidad, y k_p , k_v y k_i son las ganancias del controlador, positivas y mayores que cero.

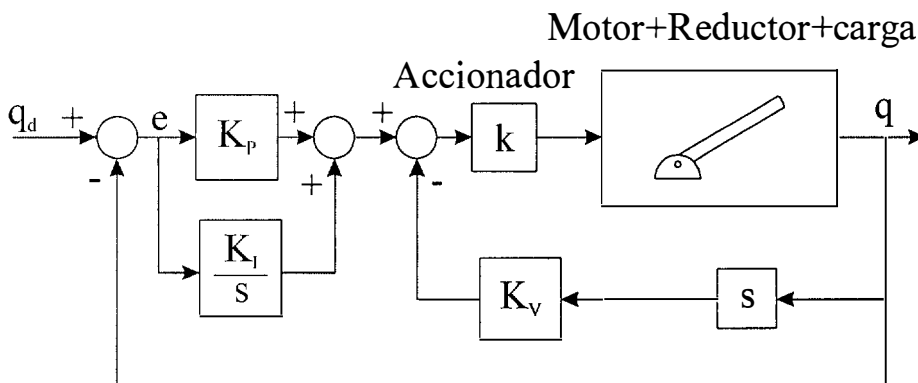


Figura 7.2 Control PID monoarticular

Haciendo la misma transformación que se ha hecho en el apartado anterior la señal de error valdría

$$e = \frac{\tau_p s + (Js + B + k_v)s^2 q_d}{(k_p s + k_i + k_v s^2) + (Js + B)s^2} \quad (7.11)$$

y con el mismo método se puede calcular la función de transferencia entre la salida deseada y la real

$$\frac{q}{q_d} = \frac{k_p s + k_i}{(k_p s + k_i + k_v s^2) + (Js + B)s^2} \cdot \frac{k_p s + k_i}{Js^3 + (k_v + B)s^2 + k_p s + k_i} \quad (7.12)$$

Si se estudia la estabilidad del sistema, volviendo a aplicar el criterio de Routh las condiciones que debe cumplir son

$$\begin{aligned} J &> 0 \\ k_v + B &> 0 \quad k_p > 0 \quad k_i > 0 \\ k_p &> \frac{k_i J}{k_v + B} \end{aligned} \quad (7.13)$$

El momento de inercia siempre es positivo, las ganancias del amplificador se han definido siempre positivas, y el coeficiente del rozamiento viscoso siempre es positivo. En caso de que no lo sea, hay que forzar a que la ganancia derivativa sea mayor que él. En la última expresión se ve que k_p tiene que ser mayor que la relación existente entre la ganancia integral y la derivativa. Se ve claramente que si la ganancia integral es más alta que las otras dos, el sistema se convierte en inestable. Se puede decir que con un regulador PD el sistema es estable en cualquier punto de trabajo, mientras que con un regulador PID hay ciertas zonas de trabajo donde el sistema puede ser inestable.

Ante una variación escalón de la entrada q_d en régimen permanente, la posición final de la articulación será igual a la deseada, $q_d = q$, aunque durante el régimen transitorio, debido a la forma de la función de transferencia la señal de error no será nula.

Si la entrada de la posición deseada q_d no varia, y el par de perturbación tiene una entrada escalón, se puede calcular el error en régimen permanente aplicando el teorema del valor final

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} se(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{(k_p s + k_i + k_v s^2) + (Js + B)s^2} = 0 \quad (7.14)$$

Por tanto, ante una perturbación el error será nulo en régimen permanente. Como se ha visto antes, el error en régimen permanente también se anula ante la entrada q_d . Está claro que en ambos casos el error siempre es cero. No obstante, el regulador no es capaz de conseguir que la señal de error sea siempre cero, es decir, que en cualquier instante la posición deseada sea igual a la actual ($q_d(t) = q(t) \quad \forall t$). El regulador PID no tiene un buen comportamiento en régimen transitorio, y si su ganancia integral k_i es muy alta puede dar lugar a que el sistema sea inestable.

A veces hay ciertas implementaciones de un regulador PID donde la ganancia integral k_i se activa únicamente cuando la posición del eje está cerca de la señal de referencia y se desactiva si el error de seguimiento es muy alto, o se está en una posición de equilibrio, para evitar que pueda haber derivas y el sistema salga de su nueva posición de equilibrio.

De todas formas se ha visto que hay efectos que no se arreglan con ninguno de estos dos controladores; no anula el error de seguimiento, es decir, la señal de posición del eje no sigue bien a la señal de la posición deseada, excepto en el régimen permanente. Estos reguladores no son capaces de resolver los problemas de fricción, o el cambio de par que se puede producir debido a la gravedad que puede oscilar entre un 20% o un 30% del par máximo permitido [Canudas, 97].

7.2.1.3 Control por realimentación de variables de estado

Otra forma de controlar un sistema es mediante variables de estado. En este caso las ecuaciones del sistema se describen con las ecuaciones que aparecen en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

donde x es una matriz que contiene las variables de estado del sistema, que en este caso son la posición y la velocidad, la matriz u que refleja la entrada al sistema (referencia de posición), y la matriz y que contiene las variables de salida que en este caso es la posición q .

Las matrices A , B , C y D contienen las relaciones que hay entre las variables de estado, las señales de referencia y las señales de salida. La obtención de estas matrices desde la función de transferencia del sistema o las expresiones obtenidas en el capítulo anterior es muy sencillo, [Dorf, 98].

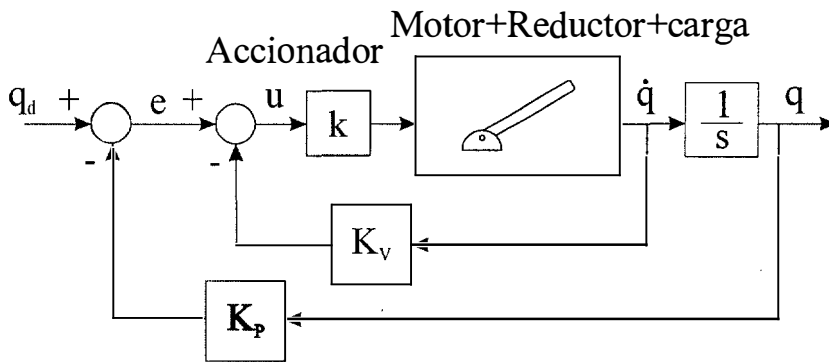


Figura 7.3 Control por realimentación del estado

Es importante resaltar que una acción de realimentación del estado pura, figura 7.3, consigue que el sistema sea estable pero su error en régimen permanente será muy grande. Para evitarlo, se acude a la realimentación del estado con acción integradora, figura 7.4, cuyo esquema coincide con el realizado mediante un control PD, figura 7.1. Sin embargo, si existe una diferencia fundamental entre los dos, el método utilizado para elegir los valores de las ganancias, que en el fondo viene dado por el lugar donde se colocan los polos del sistema. En

el caso del uso de variables de estado se puede acudir al método de colocación de polos, [Ogata, 93].

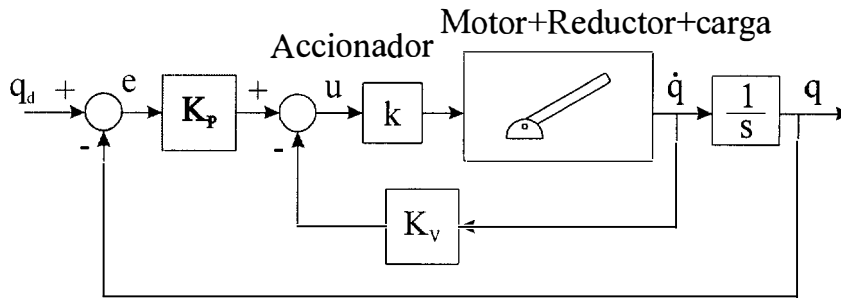


Figura 7.4 Control por realimentación del estado con acción integradora

Con una realimentación del estado con acción integradora se tiene la misma ley de control que en el caso del regulador PD, con lo que el análisis realizado para calcular la estabilidad del sistema, y el valor de la señal de error se puede aplicar a este esquema. La única diferencia estará en el rango de los valores de las ganancias proporcional, K_p y derivativa K_v .

7.2.1.4 Control PD con compensación de gravedad

Con los reguladores PD y PID no se corrige el error de seguimiento que se produce, ya que el sistema nunca se modela con una exactitud total. A la hora de calcular la función de transferencia, siempre hay factores que no se tienen en cuenta como pueden ser los efectos no lineales o la gravedad del brazo del robot. Con los dos reguladores que se presentan ahora se puede eliminar el error de seguimiento, siempre y cuando se conozcan muy bien algunas características del sistema en cada instante: el momento de inercia J , el rozamiento viscoso B , y el par producido por la gravedad $g(q_i)$.

Este método de control es muy efectivo si el robot usa accionamientos directos. En este caso el rozamiento viscoso es casi nulo, y la mayor parte del par de perturbación se debe a la fuerza de la gravedad, con lo que se podría anular su efecto aplicando este regulador [Sciavicco, 96].

La ley de control es

$$u = k_p (q_d - q) - k_v \dot{q} + g(q_i) \quad (7.15)$$

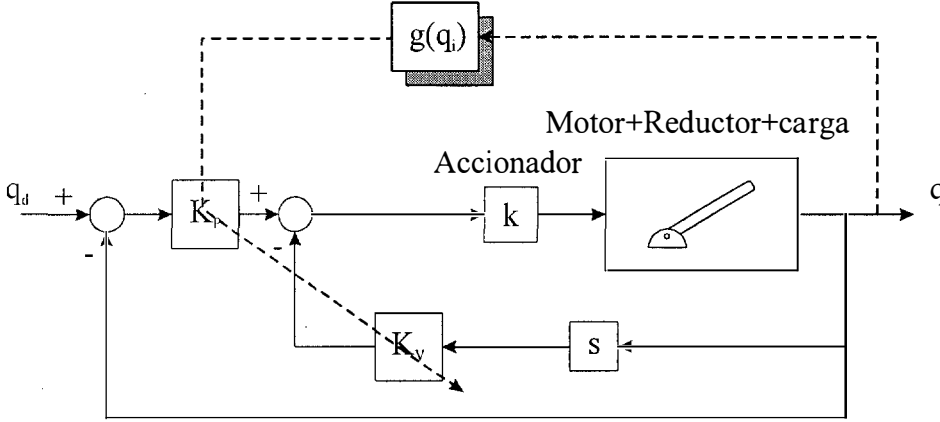


Figura 7.5 Control PD con compensación de gravedad

Al igual que en los otros dos casos el sistema será estable, y haciendo los mismos cambios en las ecuaciones que en los casos anteriores, la señal de error es

$$e = \frac{(Js + B + k_p)s q_d + \tau_p - g(q_i)}{(k_p + k_v s) + (Js + B)s} \quad (7.16)$$

Si la entrada de la señal de posición q_d no varía, y sólo actúa la perturbación con una señal de escalón

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{\tau_p - g(q_i)}{(k_p + k_v s) + (Js + B)s} \quad (7.17)$$

Si se consigue que la función $g(q_i)$ sea igual al par perturbador τ_p , el error será nulo. Para conseguir esto, es obvio que se debe conocer con una gran precisión y en cualquier instante la función $g(q_i)$. En esta función el par producido por la gravedad depende de la posición que tienen todas las articulaciones, no sólo de la que controla este regulador. Dependiendo de la posición que tiene todo el brazo, extendido o recogido, la función $g(q_i)$ tiene grandes variaciones en su resultado final.

Es importante resaltar que sin un conocimiento exacto del modelo del sistema, y en concreto de la función que determina el par de la gravedad $g(q_i)$ en la articulación, este regulador no alcanza a eliminar el error de seguimiento

7.2.1.5 Control PID con prealimentación de velocidad y aceleración

Cuando a un robot se le exige que trabaje con una gran velocidad y aceleración, lo que supone tener valores altos de k_p y k_v , lo que supone tener ganancias muy altas con lo que la mecánica sufre mucho más. Pueden aparecer vibraciones no deseadas y mayor desgaste de los motores, en los reductores y en los frenos, con lo que su tiempo de vida se reduce. Con el anterior regulador y éste se puede reducir el error de seguimiento sin necesidad de aumentar en demasía las ganancias proporcionales y derivativas.

La ley de control del regulador PID con prealimentación es

$$u = -k_v \dot{q} + k_p (q_d - q) + k_i \int_0^t (q_d - q) dt + k_{vff} \dot{q}_d + k_{aff} \ddot{q}_d \quad (7.18)$$

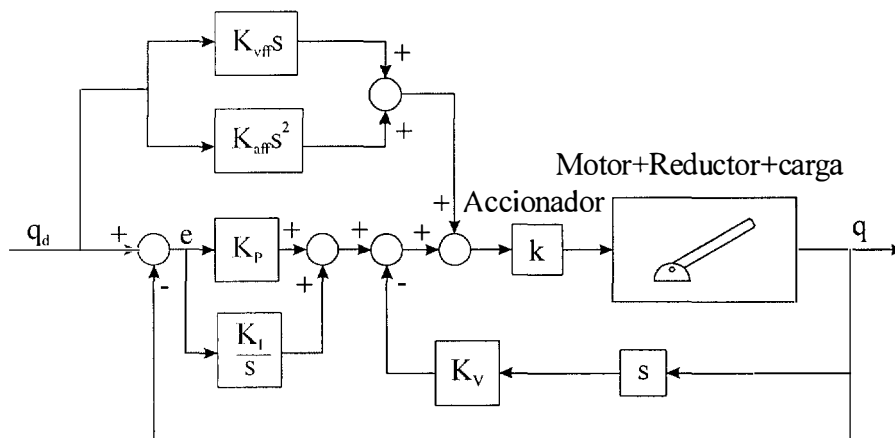


Figura 7.6 Control PID con prealimentación de velocidad y aceleración

Igualando el par a la señal de control y sumando a cada miembro el término $k_v s q_d$ la ecuación queda

$$\tau_p + (Js + B)sq + k_v sq_d = (k_p + \frac{k_l}{s} + k_v s)e + k_{vff} sq_d + k_{aff} s^2 q_d \quad (7.19)$$

con lo que el par de perturbación vale

$$\tau_p = (k_p + \frac{k_l}{s} + k_v s)e + k_{vff} sq_d + k_{aff} s^2 q_d - (Js + B)sq - k_v sq_d \quad (7.20)$$

Si se consigue que las ganancias de prealimentación cumplen las siguientes condiciones

$$\begin{aligned} k_{vff} - k_v &= B \\ k_{aff} &= J \end{aligned} \quad (7.21)$$

la ecuación quedaría

$$\tau_p = (k_p + \frac{k_l}{s} + k_v s)e + (Js + B)se \quad (7.22)$$

y la señal de error es

$$e = \frac{\tau_p}{(k_p + \frac{k_l}{s} + k_v s) + (Js + B)s} \quad (7.23)$$

donde se ve que el error no depende de la entrada q_d , aunque ante una señal de perturbación se comporta al igual que en los casos anteriores. Dentro del par τ_p sigue estando incluido el par debido a la gravedad.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} se(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\frac{1}{s}}{(k_p + \frac{k_l}{s} + k_v s) + (Js + B)s} = 0 \quad (7.24)$$

Al igual que el regulador de compensación por gravedad, para que funcione bien hay que tener un conocimiento muy bueno del modelo, y en especial de los valores del momento de inercia y del rozamiento viscoso. Es importante destacar que con el uso de estas dos prealimentaciones, los valores de las ganancias no tienen que ser muy grandes para que la articulación trabaje con velocidades y aceleraciones altas. Consecuentemente, con ganancias del regulador más bajas, la mecánica del robot sufre mucho menos, y tendrá una vida más larga.

7.2.2 Control multiarticular

En los reguladores vistos hasta ahora, cada articulación tiene un controlador que trabaja independientemente del resto, haciendo caso omiso al comportamiento de las demás. En un robot manipulador, realmente esto no es así, el robot no es un conjunto de n articulaciones independientes unas de otras, sino que se debe contemplar como un sistema multivariable con n entradas y n salidas que interactúan entre ellas por medio de relaciones no lineales. Esto es fácil de comprender si se escribe la ecuación dinámica de un robot manipulador.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + B(\dot{q})\dot{q} + F_r(q) + G(q) + \tau_d = \tau \quad (7.25)$$

donde

$M(q)$ es la matriz de inercias del sistema

$V(q, \dot{q})$ es la matriz que incluye las fuerzas centrípetas y las de Coriolis

$B(\dot{q})$ es la matriz de rozamiento viscoso

$F_r(q)$ es la matriz de rozamiento estático

$G(q)$ es la matriz de gravedad

τ_d son los pares de perturbación, y

τ los pares generados por los actuadores

7.2.2.1 Desacoplamiento por inversión del modelo

La ecuación (7.25) se puede escribir como

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_p = \tau \quad (7.26)$$

donde

$$N(q, \dot{q}) = V(q, \dot{q}) + B(\dot{q})\dot{q} + F_r(q) + G(q) \quad (7.27)$$

engloba todas los pares distintos de los que se producen por la inercia

Si fuese posible escribir la ecuación de control como una función del comportamiento del manipulador

$$u = M(q)y + N(q, \dot{q}) \quad (7.28)$$

donde el vector de las aceleraciones $\ddot{\mathbf{q}}$ es igual a la señal \mathbf{y} . Así, la componente y_i del vector \mathbf{y} , se deriva dos veces dando como resultado el valor de la articulación q_i , con lo que se llega a una expresión que es independiente del resto de las articulaciones del robot. De esta forma, se desacoplan todas las variables de control del sistema \mathbf{y} . El estudio se vuelve a simplificar porqué, según la ecuación (6.51), el problema de control se reduce a encontrar una ley de control que estabilice la señal \mathbf{y} . Para esto, se puede usar un control PD, o un control PID, usando la ecuación (6.52) que se calcula para cada una de las articulaciones como se ha hecho anteriormente. Este tipo de control tiene dos bucles de realimentación: uno interno que obtiene la relación lineal y desacoplada de la dinámica del manipulador, y otro exterior que estabiliza el sistema lineal completo.

$$\mathbf{y} = \ddot{\mathbf{q}}_d + K_D(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + K_P(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + K_I \int_0^t (\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) d\tau \quad (7.29)$$

donde K_D , K_I y K_P son matrices simétricas y definidas positivas, para que el sistema sea estable.

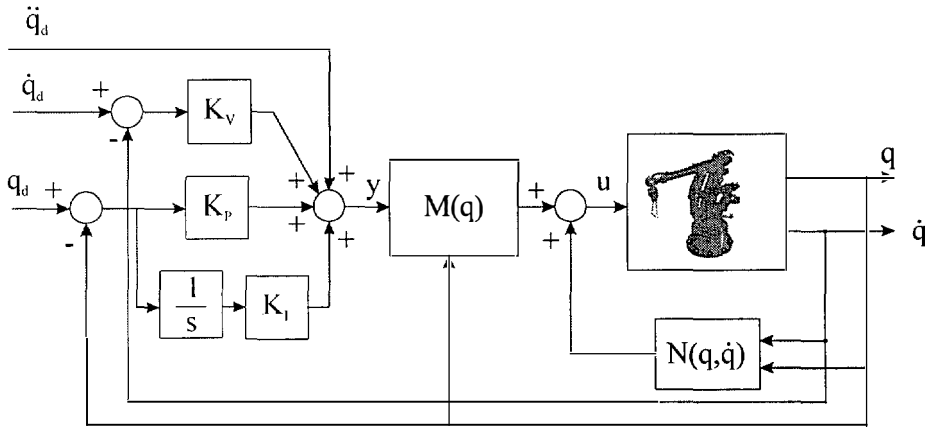


Figura 7.7 Control por desacoplamiento por inversión del modelo

A partir de la unión de las ecuaciones (7.27) y (7.28) se formula la expresión general, que es conocida con el nombre de control de par calculado, y según se tengan en cuenta diferentes términos de la matriz N habrá diferentes casos particulares.

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \left[\ddot{\mathbf{q}}_d + K_D(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + K_P(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + K_I \int_0^t (\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) d\tau \right] + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (7.30)$$

De entre los diversos trabajos que se han hecho con este tipo de control, cabe destacar por el interés que tiene para el desarrollo de esta tesis, los trabajos de [Kelly, 97] y [Santibañez, 98] para el diseño de un regulador con compensación de gravedad.

Para usar este tipo de control hay que tener un conocimiento completo del modelado dinámico del manipulador, conociendo perfectamente y calculando en cada instante (en tiempo real), cada una de las matrices de fuerzas que componen la ecuación (7.28). Este problema siempre es difícil de resolver, ya que el modelo siempre se conoce con un cierto grado de incertidumbre ya que es muy difícil tener un conocimiento perfecto de todos los parámetros del manipulador. Por otra parte el cálculo de la dinámica inversa debe realizarse con tiempos de muestreo pequeños, del orden de milisegundos, para poder obtener un buen control del robot. Esto lleva a exigir tener una buena arquitectura *hardware* y *software*. A veces, si no se tiene un equipo de control muy rápido, se puede acudir a reducir el tiempo de cálculo buscando únicamente los términos dominantes de la dinámica inversa [Sciavicco, 96].

Hay otras dos formas de conseguir anular el error de seguimiento de la trayectoria deseada en un sistema multiarticular:

- Método de Lyapunov. Con este modelo no se busca linealizar el sistema o desacoplar las diferentes ecuaciones dinámicas de cada una de las articulaciones. Simplemente se busca una función que tenga una estabilidad asintótica. Esta función está relacionada con la energía cinética del manipulador y su matriz de inercias.
- Modelo basado en la pasividad. En este caso se intenta aprovechar las propiedades de pasividad que tienen los modelos de Lagrange. Para ver más sobre estos dos modelos se puede consultar [Canudas, 1997], y [Lewis, 93].

Si hay incertidumbre en el conocimiento de las diferentes matrices de la ecuación (7.28) se puede acudir al uso de técnicas de control robusto de las cuáles, las más usuales en robótica son:

- Control deslizante. Se define una superficie deslizante que refleja el comportamiento dinámico del sistema, e indica cuál debe ser la señal de acción sobre el sistema para llegar a

unas condiciones de funcionamiento determinadas, mediante unas funciones de paso (*switching functions*). La invariancia de la superficie de cambio implica una estabilidad asintótica del error de seguimiento a pesar de la incertidumbre del modelo dinámico. Este método tiene la desventaja de trabajar con frecuencias muy altas que pueden dar lugar a un castañeteo (*chattering*), y a la consiguiente fatiga de los motores.

- Control saturado. Se sustituyen las funciones de paso del método anterior por funciones de saturación. El precio a pagar por la suavidad de la ley de control es la pérdida de la estabilidad asintótica del error de seguimiento. En este caso, el error converge a una banda permitida cuyo ancho es menor conforme la función de paso se aproxime a la de saturación. Para ver más sobre estos dos modelos se puede consultar [Canudas, 1997].

7.2.3 Control Adaptativo

El estudio de esta clase de control comenzó en los años 50, usándose principalmente en el control de los aviones. Durante los años 60, aunque hubo muchos estudios teóricos sufrió un receso debido a la gran cantidad de cálculo que se necesitaba y a que los computadores de aquella época no estaban suficientemente desarrollados para una gran velocidad de cómputo. En los finales de los 70 y principios de los 80, con las nuevas tecnologías digitales y los nuevos microprocesadores, el control adaptativo volvió a tomar auge y a utilizarse en diferentes sectores como el de la robótica, el aerospacial y el químico.

La idea del control adaptativo puede verse como un sistema con dos bucles de regulación con dos velocidades distintas. Uno es el que realmente controla el sistema físico y el segundo, en función de diferentes variables y condiciones de trabajo del sistema cambia los parámetros de funcionamiento del primer bucle [Åström, 89].

Es muy útil para sistemas no lineales, en los que hay incertidumbre a la hora de conocer las magnitudes de las variables que lo conforman, o si varían las ecuaciones que definen su comportamiento dinámico. Este control se puede aplicar muy bien a sistemas que tienen una

dinámica conocida, pero donde los parámetros o constantes que lo definen varían con el tiempo o con el punto de funcionamiento. El control adaptativo está pensado principalmente para sistemas no lineales que tienen un comportamiento complejo. Para su completo estudio hay que conocer diferentes campos de la teoría de control: sistemas no lineales, estabilidad, identificación de sistemas, control óptimo y control estocástico. En algunos casos el control adaptativo puede complementarse con un control robusto para manejar sistemas en los que no se tenga un modelo muy exacto del sistema ni de las perturbaciones que puede sufrir.

Uno de los objetivos del control adaptativo es estimar los parámetros de la planta que no se conocen bien; o se sabe bien cuál es la estructura de la función de transferencia del sistema pero no se conoce exactamente el valor de sus parámetros. Una de sus tareas es calcular, aunque sea con cierta incertidumbre, el valor de diferentes parámetros del sistema, midiendo diferentes señales de él, para posteriormente calcular los valores del regulador del sistema.

Hay dos métodos de control adaptativo: el control adaptativo con modelo de referencia (MRAC, *Model Reference Adaptive Control*), y el control adaptativo autoajustable (STC, *Self-Tuning Control*). Existe un tercer método que algunos autores no lo consideran un controlador de este estilo, es el control adaptativo con planificación de ganancias (GS, *Gain Scheduling*). A continuación se va a comentar cada uno de estos tres métodos.

7.2.3.1 Control MRAC

Tal y como se ve en la figura 7.8, un sistema con un control adaptativo con modelo de referencia se puede distinguir cuatro partes:

- La planta o el sistema a controlar, el robot, de la que se conoce cuál es su estructura (ecuaciones dinámicas) pero algunos de sus parámetros son desconocidos. Es decir, si el sistema fuese lineal, se conoce la función de transferencia, pero no los coeficientes de los polinomios del numerador o del denominador, con lo que no se sabe donde están los polos y los ceros, aunque sí cuántos son. En el caso de un robot, es habitual que no se sepa con exactitud cuánto valen los momentos de inercia y los rozamientos viscosos de cada articulación

- Un modelo de referencia, que a partir del conocimiento que se tiene del sistema y de las señales de referencia deseadas calcula cuál debería ser la salida ideal del sistema con el tiempo de subida, establecimiento y sobreoscilación que quiere el diseñador del control.
- Una ley de control, que puede ser cualquiera de los reguladores que se han presentado en los epígrafes anteriores en la que se podrán cambiar las diferentes ganancias del regulador. Si el regulador es lineal, se dice que está linealmente parametrizado. Estos reguladores son los más indicados en el control adaptativo porque aseguran la estabilidad y convergencia del sistema.
- Una ley de adaptación cuya función es calcular los valores de los parámetros del regulador de la planta, y que consiga igualar la respuesta del sistema a la respuesta deseada. El objetivo final es conseguir que el error de seguimiento sea nulo, comprobando su convergencia a cero, y la estabilidad del sistema. Esta estabilidad se puede calcular aplicando los cálculos de estabilidad de sistemas no lineales [Slotine, 91], o aplicando la teoría de Lyapunov [Khalil, 95]. Como ley de adaptación se suele utilizar la regla del MIT que aparece en la siguiente ecuación, y cuya finalidad es minimizar el cuadrado del error de seguimiento.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad e = y - y_d \quad (7.31)$$

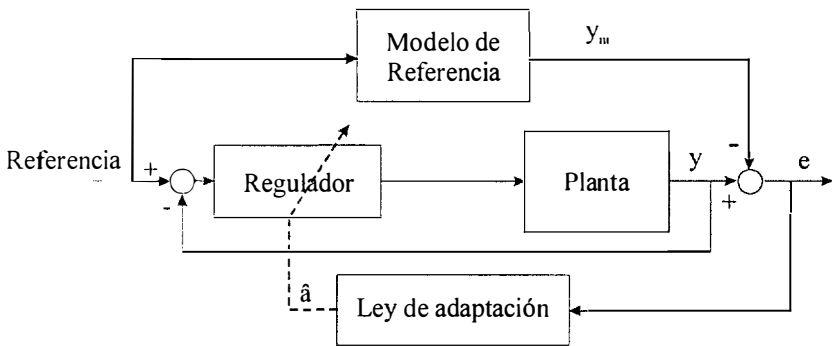


Figura 7.8 Control adaptativo MRAC

7.2.3.2 Control con regulador autoajutable

Este sistema, tal y como se ve en la figura 7.9 se divide en cuatro bloques:

- El sistema a controlar, que al igual que en el caso anterior se conoce cuál es su estructura pero algunos de sus parámetros son desconocidos. A veces, para obtener mayor simplicidad

en las siguientes etapas, se considera que los parámetros que definen la estructura son constantes pero desconocidos.

- Un bloque que realiza la estimación de estos parámetros, usando normalmente un método recursivo de estimación de parámetros. La identificación se realiza mientras este sigue funcionando en línea. El bloque de estimación recoge datos de la entrada al sistema, las señales de control, y de su salida. Con esto el estimador calcula cuáles son los parámetros desconocidos del sistema.
- El bloque de elección del regulador que tiene como entrada los parámetros que proporciona el estimador, y las especificaciones de comportamiento dinámico que quiere el diseñador del control. A partir de aquí, este bloque calcula los valores de las ganancias que debe tener el regulador.
- Una ley de control, que puede ser cualquiera de los reguladores que se han presentado en los epígrafes anteriores, en la que se podrán cambiar las diferentes ganancias del regulador.

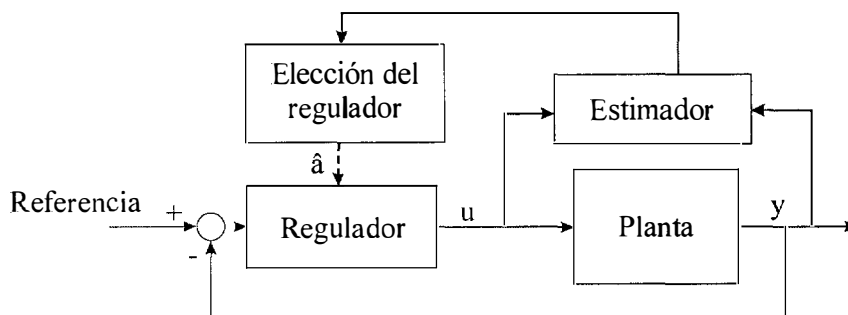


Figura 7.9 Control adaptativo con regulador autoajustable

7.2.3.3 Control con planificación de ganancias

Algunos autores no han considerado este tipo de control como adaptativo, aunque suele aparecer en los mismos textos que los dos anteriores. En este método se buscan ciertos puntos de trabajo que cubran todo el rango de funcionamiento del sistema. En cada uno de ellos se realiza una aproximación lineal del sistema, y se escogen los valores de las ganancias más adecuadas en ese rango de funcionamiento para el regulador que se ha escogido. Así se consigue una tabla de valores del regulador. En función de las condiciones de trabajo del sistema en cada instante se elegirán los valores adecuados del regulador.

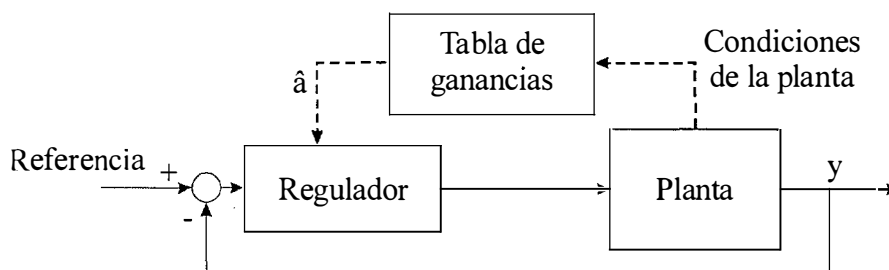


Figura 7.10 Control adaptativo con planificación de ganancias

Las variables que se usan deben reflejar las no linealidades que hay en la planta. Sería recomendable que éstas no varíen rápidamente para que no se produzcan cambios bruscos en las ganancias de los reguladores. Uno de los asuntos más interesantes de este esquema es saber que ocurrirá cuando el sistema pasa de una región de funcionamiento a otra; como se va a comportar el sistema durante la transición de un regulador a otro. Si hubiese problemas, en estos casos se aplicarán técnicas de planificación o de interpolación

La adaptación del regulador es un mecanismo de compensación en bucle abierto, ya que no tiene por qué utilizar la salida del sistema para el ajuste de los parámetros del regulador. En este caso se puede considerar que las ganancias del regulador se ajustan mediante una prealimentación de compensación. La cuestión por la que algunos autores no lo consideran un control adaptativo es porque no hay una realimentación del funcionamiento del sistema en bucle cerrado que pueda compensar los errores en la planificación. Aunque si uno se acoge a la definición dada por [Åström, 95] se puede considerar como control adaptativo

Sus principales desventajas son:

- Si el sistema trabaja fuera de las regiones de funcionamiento para las que se han calculado todos los valores de la tabla de ganancias del regulador, no se sabe que puede pasar, y en consecuencia no se puede asegurar su estabilidad.
- El cálculo completo de la tabla de ganancias lleva mucho tiempo y muchas horas de simulación.

Este sencillo esquema de control ha dado muy buenos resultados en muchos campos, y es muy apropiado cuando la dinámica del sistema está definida por un conjunto de variables que se pueden medir, y que en definitiva, servirán para elegir entre un regulador u otro de la tabla. Hay que decir que la idea de cambios de valores del regulador no es nada nueva, pero no se ha podido implementar hasta que la tecnología electrónica no avanzó lo suficiente.

7.2.3.3.1 Control PD adaptativo en función de la gravedad

Uno de los parámetros que más afectan al comportamiento dinámico del movimiento de un robot es la gravedad. Tal es la importancia que tiene que se ha llegado a desarrollar un esquema de control con compensación de gravedad, como ya se ha visto. La función $g(q_i)$ es fuertemente no lineal ya que depende de la masa del conjunto de eslabones que vaya a mover el accionamiento (en el caso del robot ROMA no es siempre la misma), de los valores de las articulaciones q_i , y de si el movimiento es hacia arriba o hacia abajo. Además, queda claro que no será nada fácil conocer con gran exactitud en cada instante cuál es el valor de dicha función.

Otra forma de tener en cuenta los efectos gravitatorios es desarrollar un control adaptativo con una tabla de ganancias cuyos parámetros de entrada sean las variables anteriormente mencionadas para diferentes intervalos en las condiciones de trabajo, donde se pueden calcular diferentes ganancias para el regulador. Entre los trabajos que utilizan esta clase de control se pueden destacar los trabajos de [Gambao, 96] en un robot de grandes dimensiones que funciona con accionamientos hidráulicos.

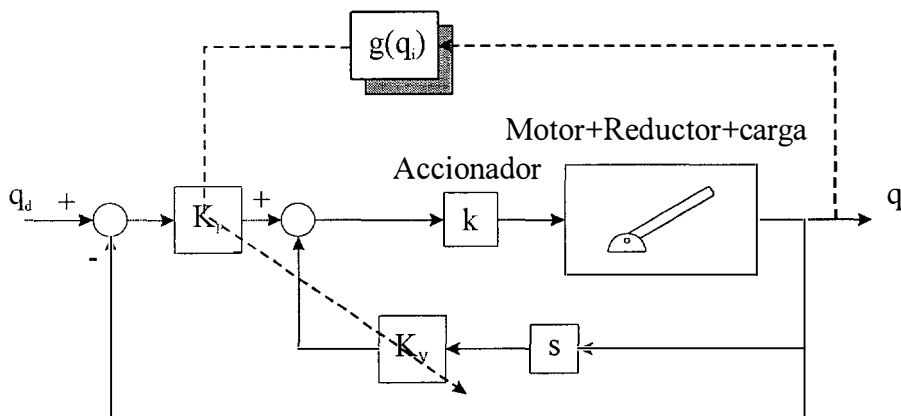


Figura 7.11 Control PD adaptativo en función de la gravedad

7.3 Control del robot escalador ROMA y conclusiones sobre los demás controles.

Como ya se expuso en el capítulo 2 no ha habido demasiados estudios sobre el control de posición de las articulaciones de un robot escalador. En gran medida, se debe a que la mayoría de los robots escaladores trabajan con accionamientos neumáticos y la preocupación de los investigadores de éste área se ha centrado en el control de la secuencia de movimiento de las extremidades del robot, lo que en la terminología inglesa se conoce como *gait*.

Respecto al control de agarre, el algoritmo de control suele ser sencillo. Los robots que llevan ventosas de vacío tienen un sensor que miden el nivel de vacío que se ha producido dentro de ellas. Hasta que no se consigue el valor deseado, el robot no considera que esa extremidad esté preparada para el agarre. En algunos casos, el robot no espera más y mueve la pata para buscar otra zona donde agarrarse mejor.

En el robot ROMA se ha hecho un pequeño estudio del control de agarre, pero el trabajo principal de la tesis se ha desarrollado en demostrar la capacidad de movimiento y de control de posición del robot sobre entornos tridimensionales.

En un robot escalador, uno de los principales factores a la hora de su diseño es su peso. Todos sus actuadores tienen que estar trabajando con un rendimiento máximo. Las variaciones de par que sufren los accionamientos son muy grandes; un mismo motor, a veces moverá una pata, y otras, cuando la pata esté sujeta a la pared, tendrá que mover el resto del cuerpo del robot. En un mismo movimiento, el par producido por la carga varía bastante, sobre todo debido a los efectos de la gravedad. La fuerza que deberá ejercer cada actuador dependerá de la posición que tenga el robot en la estructura, de qué parte del robot tiene que mover, y si es a favor o en contra de la gravedad.

Está claro que, al igual que ocurre en cualquier robot industrial tradicional, el modelo dinámico del sistema no es lineal. Contendrá las no linealidades inherentes a los sistemas que tienen reductores Harmonic-Drive [Tuttle 92] o transmisiones por medio de husillos [Armstrong Hérouvry, 91]. La gravedad también es un factor no lineal muy a tener en cuenta en estos robots como ya se comentó antes.

Para la identificación del modelo dinámico del robot se pueden usar todas las técnicas citadas en la primera parte de este capítulo. Con los modelos ARX, ARMAX y error de salida no es posible identificar todos los parámetros principales del sistema. Otras veces, las entradas y las respuestas del sistema no reúnen las condiciones necesarias para trabajar con esta clase de métodos de identificación, como se verá en el siguiente epígrafe. Para esta situación, se ha identificado usando el modelo de la ley física, que presenta algunas ventajas en ciertos casos. Con él se puede expresar explícitamente el efecto de la gravedad en la ecuación, cuestión que con la utilización del primer método no es posible. Aparte de la gravedad, también se puede estudiar por separado otro efecto no lineal importante, como es la fricción estática, sobre todo en el caso de los accionamientos que levantan o bajan las distintas partes del robot.

Una vez conocido el modelo dinámico del robot, la siguiente tarea es elegir el control más adecuado que consiga las mejores prestaciones en posición, velocidad y aceleración del robot. Debido a sus características de diseño, el robot ROMA tiene un solo amplificador, con lo que en principio, las técnicas de control monoarticular son las más indicadas para aplicar.

El control PD y el PID realimentado aseguran la estabilidad del sistema para cualquier ganancia positiva de los elementos del regulador, pero no consiguen eliminar el error de seguimiento de la trayectoria real sobre la deseada. El control PD realimentado con compensación de gravedad y el control PID con prealimentación de velocidad y aceleración consiguen un mejor ajuste de la respuesta a la señal de referencia, pero es necesario un conocimiento exacto de la variación de la gravedad y de la fricción durante todo el movimiento de la articulación.

Las técnicas de control multiarticular que emplean control robusto o control adaptativo también se pueden usar en un sistema con un control monoarticular. Son los más indicados en los sistemas que tiene un modelo dinámico variable a lo largo del tiempo, como es el caso del control de las articulaciones del robot ROMA que varían, fundamentalmente, por la carga que tienen que mover (ya sea el cuerpo, o un brazo) y el par debido a la gravedad.

Las posibilidades de utilización de un control robusto pueden ser bastante adecuadas para el tratamiento de este tipo de sistemas. El uso del control deslizante permite suponer resultados prometedores al incluir incertidumbres en el modelo que son inevitables en la identificación de cualquier sistema real. No obstante, hay que tener en cuenta que debido a su complejidad matemática, este método no tiene una fácil implantación en un sistema real de rápida respuesta.

El control adaptativo constituye una metodología más interesante en un principio para abordar el problema en los robots escaladores. Su objetivo es controlar un sistema con no linealidades muy acusadas, por medio de dos bucles de regulación distintos que funcionan con una escala de tiempos distinta. Hay un bucle interno más rápido, que realiza el control de la articulación, y otro exterior, más lento, para la actualización de los parámetros del primero. Las dificultades de su implementación provienen de la necesidad de la estimación en línea de los parámetros con incertidumbre del sistema, y en consecuencia de los parámetros del regulador. Todo este cálculo tiene un coste muy elevado, y lleva tras de sí una notable complejidad.

El método de planificación de ganancias resulta adecuado cuando el comportamiento dinámico del sistema a controlar está bien determinado por ciertas variables del sistema que son medibles. Normalmente, las variables que determinan el comportamiento del sistema son las coordenadas generalizadas de cada articulación, la dirección de su movimiento, y la carga que tiene que mover cada articulación, que es el estudio principal de esta tesis. Es necesario por tanto, que haya la posibilidad de leer estas variables del sistema para poder ajustar los correspondientes parámetros de control del sistema. La obtención de la posición del robot se

puede conseguir de la lectura de los sensores de posición que hay en cada articulación, y la carga que se va a mover, analizando las instrucciones del programa que se está ejecutando.

La escasez de investigaciones y, más aún, de realizaciones prácticas de estos sistemas, es la causa principal de que apenas existan publicaciones en las que se resuelva el problema de control de robots de este tipo mediante el uso de técnicas que varíen los parámetros de control en línea, constituyendo su diseño e implantación práctica una de las principales aportaciones de la presente tesis.

En conclusión, respecto a las diferentes técnicas de control en los robots escaladores se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Hasta ahora, no ha habido demasiados estudios sobre el control de posición de las diferentes articulaciones de un robot escalador. La preocupación general, que vino derivada de los robots caminantes, ha sido la de controlar el paso.
- El uso de un sistema de control clásico no resulta el más adecuado para este tipo de robots ya que no soluciona ninguno de los efectos que se producen por la variación de la carga, la gravedad o las fricciones.
- Las técnicas de control robusto son adecuadas para estos sistemas debido a su capacidad para trabajar con modelos de incertidumbre.
- Las técnicas de control adaptativo y planificación de ganancias son las más apropiadas para la implantación práctica de sistemas de control de este tipo de robots. Su capacidad para trabajar con modelos con incertidumbre y de parámetros variables les hace muy indicadas para resolver el problema.
- El método de planificación de ganancias se muestra como una metodología muy apropiada si es posible minimizar sus principales inconvenientes en lo que se refiere al coste computacional de los diferentes parámetros de control. Para hacer la tabla de ganancias es necesario identificar el modelo dinámico del sistema real en las diferentes condiciones de funcionamiento que se pueden presentar durante el movimiento del robot.

Atendiendo a estas conclusiones, en el capítulo siguiente se presenta una implantación práctica de un sistema de control que resuelve el problema de los robots escaladores de esta clase. En el próximo capítulo se muestran los resultados de los diferentes métodos de identificación que se han usado.

Asimismo, para controlar el agarre de las pinzas se han desarrollado dos tipos de control: uno que cierra el bucle de control en posición, y otro que controla el valor de la fuerza que ejerce la pinza midiendo la intensidad de corriente que circula por el amplificador.

Es importante resaltar que aunque todo este estudio se ha hecho en sistemas continuos, el sistema real es un sistema digital con un tiempo de muestreo de 30 μ s. Con un tiempo tan pequeño, todo lo que se ha visto sobre estabilidad y valores en régimen permanente se puede aplicar al sistema a estudiar.

7.4 Control del robot ROMA y resultados experimentales

El esquema de control que hay para cada eje está representado en la figura 7.12

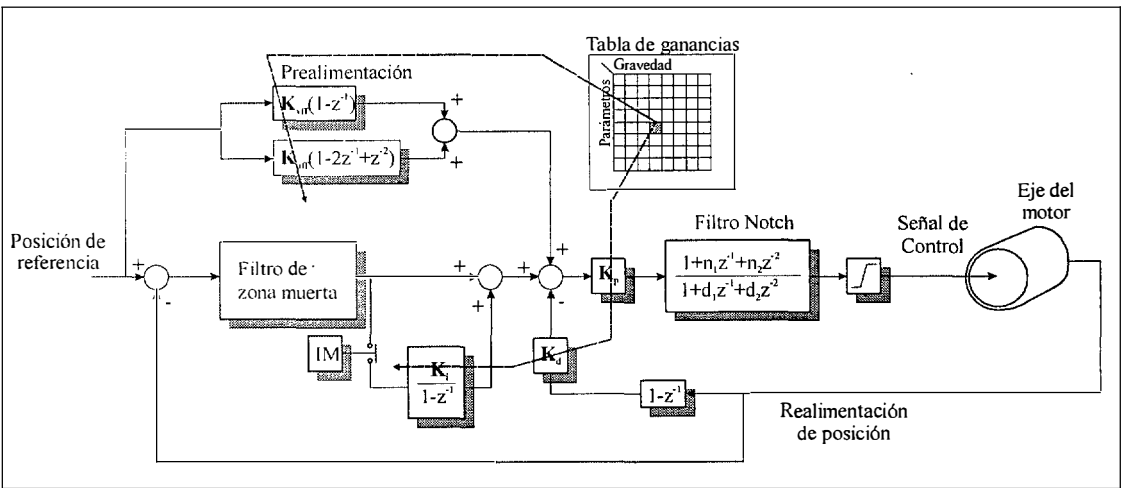


Figura 7.12 Esquema de control PID adaptativo en función de la gravedad con prealimentación de velocidad y aceleración

El regulador tiene una acción proporcional (K_p) en la cadena directa, una ganancia derivativa (K_d) en la señal de realimentación de la velocidad, para suavizar la señal de salida y una acción integral (K_i) para eliminar errores en régimen estacionario. Entre las tres mejoran las condiciones dinámicas del movimiento de los motores y aminoran el error en régimen permanente.

La ganancia integral se puede activar o desactivar para evitar el efecto *wind-up* que puede llegar a crear saturaciones en la señal control. Finalmente, un filtro de tipo muesca se encarga de eliminar la frecuencia de resonancia del sistema, sin variar la ganancia de la señal de control. El filtro de la zona muerta tiene en cuenta los efectos no lineales provocados por la saturación y una zona muerta, como los que pueden provocar los huelgos que existen en los reductores.

Hay dos prealimentaciones, una para compensar los retrasos dinámicos que pueden dar lugar a errores de seguimiento elevados (K_{aff}), y otra para la compensación de la fricción estática o deslizante (K_{vff}). Por último, a la salida de la señal de control hay un filtro de segundo orden (*Notch Filter*) para atenuar el ruido que pueda contener la señal en determinadas frecuencias.

Si las señales de referencia son escalones puros, la mecánica del robot estaría sometida a fuertes aceleraciones y esfuerzos dinámicos que acabarían por dañarla. Por tanto, es importante usar un perfil que reduzca los cambios bruscos de aceleración. La combinación de la función del regulador y de la señal de referencia definiendo su perfil de velocidad permitirán mejorar el comportamiento dinámico de cada una de las articulaciones.

Todos los sistemas modelados, junto con el diagrama de control de la figura 7.12, han sido implementados en la herramienta de simulación Simulink de Matlab. Con esta herramienta se ha realizado una primera búsqueda de los valores de los reguladores de las distintas articulaciones. Esta primera aproximación ha servido para conocer cuáles deben ser las regiones [Åstrom, 96] en las que se pueden dividir los movimientos de cada una de las

articulaciones y cuáles deben ser los valores de los parámetros a utilizar. Los valores calculados sirven de punto de partida para los que se usarán en el sistema real. Los valores finales que se utilizan en el robot se presentan en las siguientes tablas y figuras. Para no poner las de todos los motores, se ha dividido en los cuatro grupos que se han expuesto en el epígrafe 7.2. Los valores de los otros motores son muy parecidos a la tabla correspondiente a su grupo que aparece aquí. Para consultar los valores de todas las tablas de ganancias de todas las articulaciones, se puede ver [Thomas, 99].

7.4.1 Motor 1 y 8

Para el motor 1 se ha dividido el rango de funcionamiento en dos regiones, en función de si la pinza está abriéndose o cerrándose. Los valores de las ganancias son

	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
Abrir	14000	1200	250	200	200
Cerrar	12000	1000	250	200	200

Tabla 7.1 Tabla de ganancias del motor 1 cerrando y abriendo la pinza

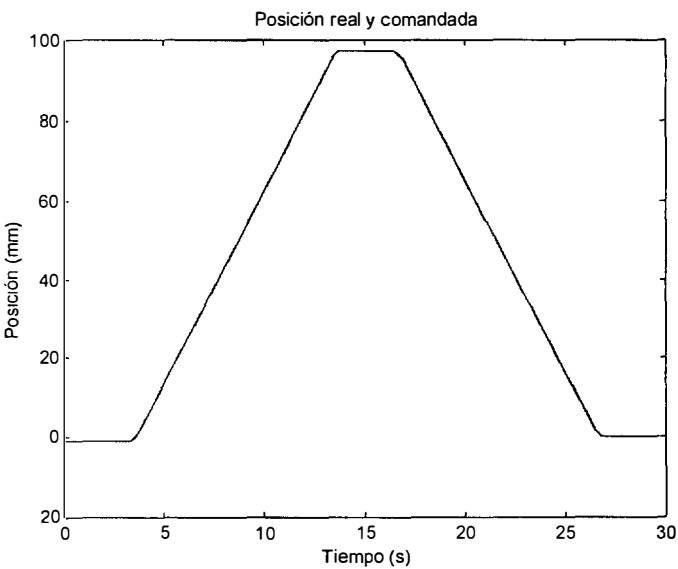


Figura 7.13 Posición real y comandada del motor 1 usando un perfil de velocidad trapezoidal

La falta de oscilaciones en régimen permanente en este perfil, permite ver que se ha reducido significativamente la fricción que existía en el movimiento de las pinzas, tal y como aparecía en las figuras 6.14, y 6.15, y el perfil de velocidad y posición se ha vuelto mucho más suave.

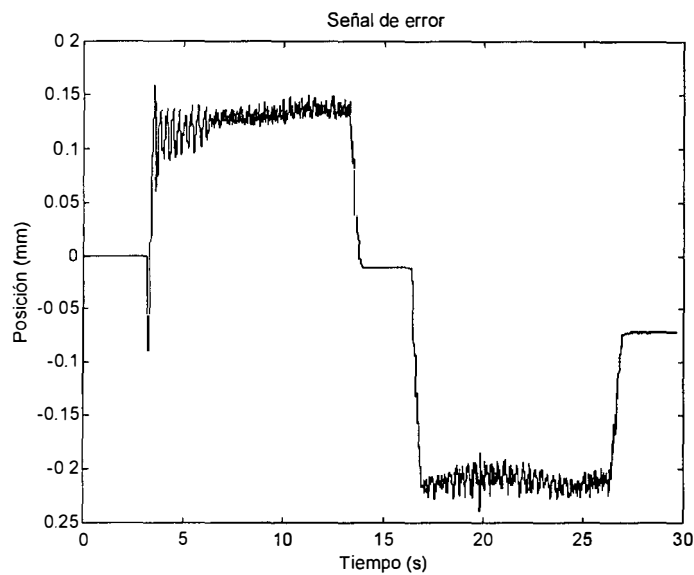


Figura 7.13 Error entre la posición real y la comandada del motor 1

Tal y como muestra la figura 7.13, la señal de error tiene el valor máximo entre 0.15 mm y -0.25 mm, mientras que el error en régimen permanente está entre 0.011 mm y 0.07 mm.

7.4.2 Motor 2 y 7

En los motores 2 y 7 hay dos tablas de ganancias en función de si la articulación mueve solo la pinza o mueve el cuerpo y el brazo que está suelto. Este es uno de los movimientos que debe realizar para cambiar de una viga a otra.

	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
Giro negativo	16000	4000	240	300	400
Giro positivo	15000	3800	200	350	500

Tabla 7.2 Tabla de ganancias del motor 2 moviendo solo una pinza

	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
Giro negativo	22000	5400	240	450	600
Giro positivo	18000	4400	200	500	600

Tabla 7.3 Tabla de ganancias del motor 2 girando todo el cuerpo y el brazo suelto

La figura 7.15 muestra el movimiento de esta articulación cuando la articulación 2 gira 80° en un sentido y en el contrario, volviendo finalmente a la posición en el origen.

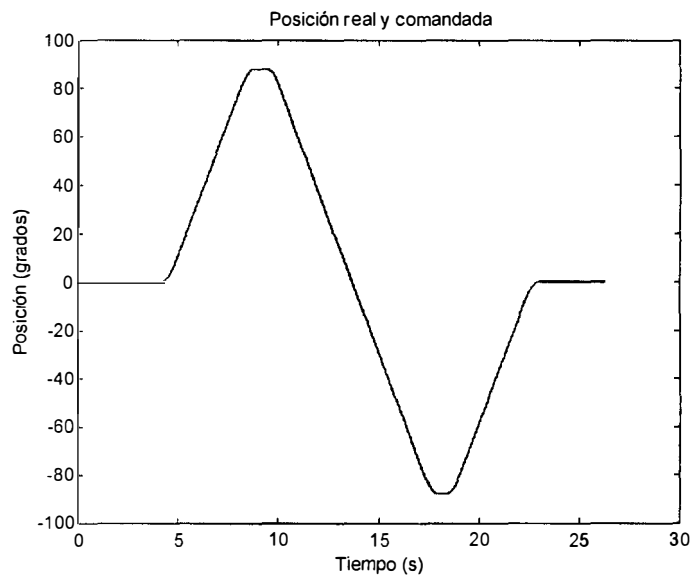


Figura 7.15 Posición real y comandada del motor 2 moviendo una pinza, usando un perfil de velocidad trapezoidal

La señal de error se muestra en la figura 7.14, donde se ve que el error en régimen permanente está entre 0.02° y 0.01° sexagesimales, mientras que el error de seguimiento toma valores entre 0.6° y -1°.

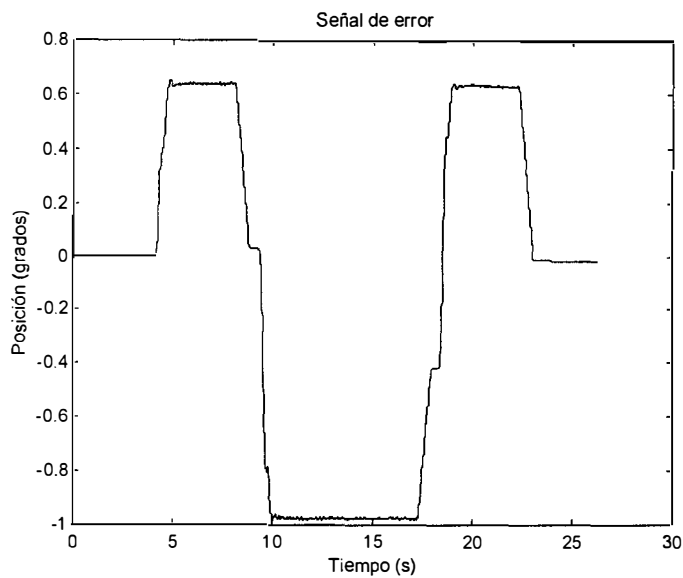


Figura 7.14 Error entre la posición real y la comandada del motor 2

7.4.3 Motor 3 y 6

En los motores 3 y 6 hay dos tablas de ganancias, una que se usa cuando solo mueve una pinza y otra cuando mueve el cuerpo y el brazo que queda suelto. Éste último movimiento es el que realiza cuando el robot se cambia de una viga a otra o a una columna. En este caso los parámetros de entrada serán el sentido del movimiento y el valor del ángulo girado por la articulación.

Rango (grados)	Sentido	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
-90, -45	↑↑	15000	500	400	360	140
-45, 0	↑↑	14800	500	400	150	35
0, 45	↑↑	14800	400	200	75	35
45, 90	↑↑	12500	200	100	50	35
90, 45	↓↓	4000	200	100	50	35
45, 0	↓↓	4000	180	100	50	35
0, -45	↓↓	4000	300	250	50	35
-45, -90	↓↓	5500	400	300	50	35

Tabla 7.4 Tabla de ganancias del motor 3 levantando una pinza

Rango (grados)	Sentido	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
-90, -45	↑↑	14000	2500	350	250	100
-45, 0	↑↑	21800	2500	400	150	35
0, 45	↑↑	24000	5000	200	75	35
45, 90	↑↑	17500	2200	100	50	35
90, 45	↓↓	14000	3200	100	50	35
45, 0	↓↓	21800	2180	100	50	35
0, -45	↓↓	24000	5000	350	50	35
-45, -90	↓↓	17500	2400	300	50	35

Tabla 7.5 Tabla de ganancias del motor 3 levantando el cuerpo y la pinza que queda suelta

La figura 7.17 refleja un movimiento que va desde la posición de 90°, en la que el par producido por el peso del brazo del robot es nulo, hasta la posición de 45° y vuelta a la de reposo que es la de 90°. Hay que indicar que el par producido por la gravedad es máximo cuando la posición de la articulación es 0°.

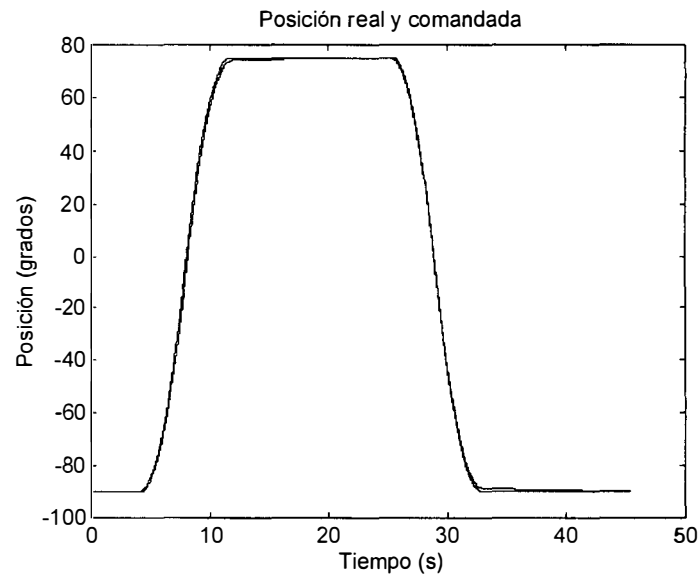


Figura 7.17 Posición real y comandada del motor 3 moviendo una pinza

La figura 7.18 muestra la señal de error de este movimiento. Se ve claramente que el error de seguimiento es mucho mayor cuando el eje está subiendo, llegando a un valor máximo de 5.5°. Si el eje se mueve a favor de la gravedad, la señal de error no sobrepasa el valor de 2°. En ambos casos, el valor final en régimen permanente es menor a 0.15°.

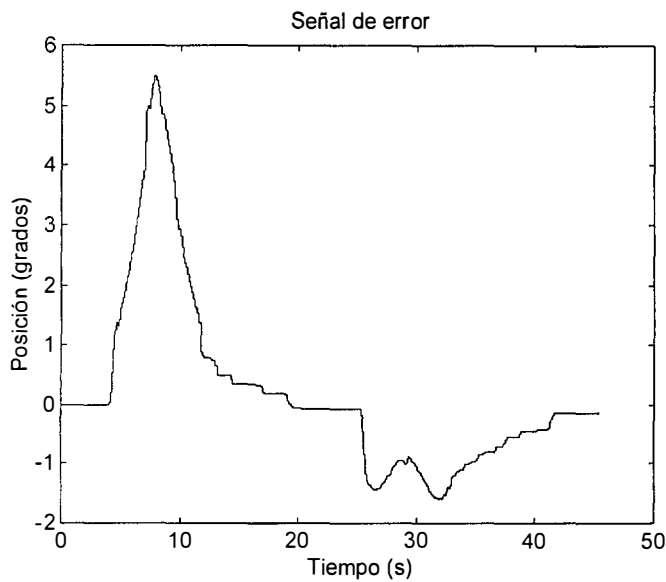


Figura 7.18 Error entre la posición real y la comandada del motor 3

7.4.4 Motor 4

En el motor 4 se han considerado solamente distintas ganancias si el robot se extiende o se encoge. No se tiene en cuenta si el movimiento se hace a favor o en contra de la gravedad, ya que la relación de reducción es muy alta y con un engranaje helicoidal el sistema es prácticamente irreversible.

	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
Extensión	14000	1400	240	300	400
Encogimiento	12000	750	200	450	500

Tabla 7.6 Tabla de ganancias del motor 4

En el motor 4 los valores de posición y error son:

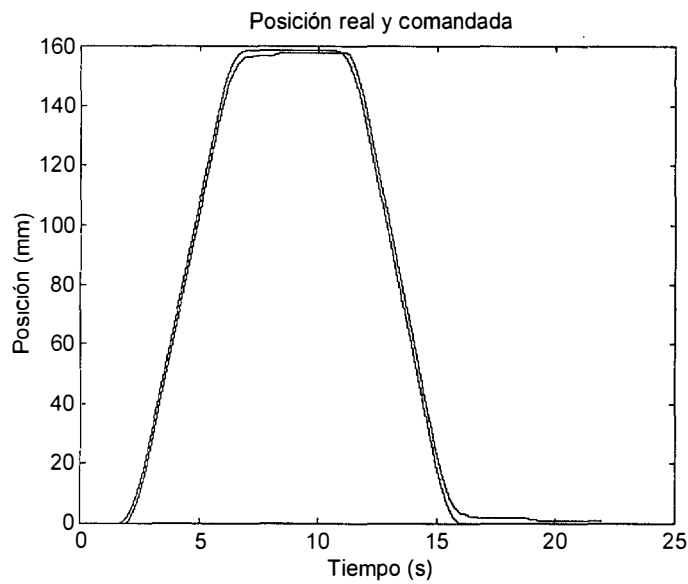


Figura 7.19 Posición real y comandada del motor 4

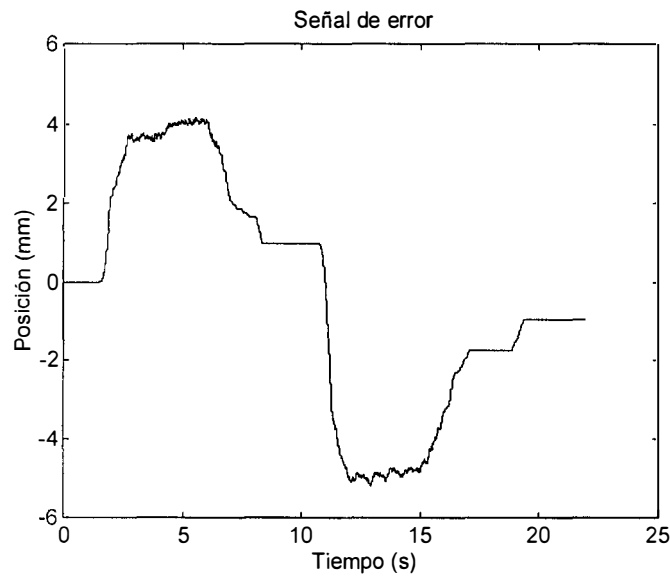


Figura 7.20 Error entre la posición real y la comandada del motor 4

El valor de la señal de error, es mayor en esta articulación que en los motores 1 y 8. Hay que indicar que en este caso, la transmisión de esta articulación tiene un mayor juego y una fricción más acusada que la de los motores que mueven las pinzas. De todas formas, que el error de seguimiento este en torno a los 4 mm, y el valor final en régimen permanente valga 1.5 mm se puede considerar aceptable en el movimiento del robot.

7.4.5 Motor 5

El motor tiene un rango de giro de 360°, con lo que se ha dividido en intervalos de 45°. Esta articulación mueve solo un brazo, y nunca el cuerpo y el brazo libre. Los valores de planificación de ganancias son:

Rango (grados)	Sentido	K_p	K_d	K_i	K_{vff}	K_{aff}
(0, 45); (0, -45)	↑↑	13000	3000	250	300	300
(45, 90); (-45, -90)	↑↑	13500	4000	250	300	250
(90, 135); (-90, -135)	↑↑	14000	5000	250	375	250
(135, 180); (-135, -180)	↑↑	14500	6000	100	350	250
(135, 180); (-135, -180)	↓↓	13000	3000	100	250	150
(90, 135); (-90, -135)	↓↓	13500	4000	100	250	150
(45, 90); (-45, -90)	↓↓	14000	5000	250	250	150
(0, 45); (0, -45)	↓↓	14500	6000	300	250	150

Tabla 7.7 Tabla de ganancias del motor 5

Para los valores negativos de los ángulos, los valores de las ganancias son iguales a las que se muestran en la tabla. Y en el motor 5 los resultados son los que se muestran en la figura 7.21 y 7.22. El error final está alrededor de los 0.5°, que también se puede considerar aceptable a la hora de posicionar esta articulación.

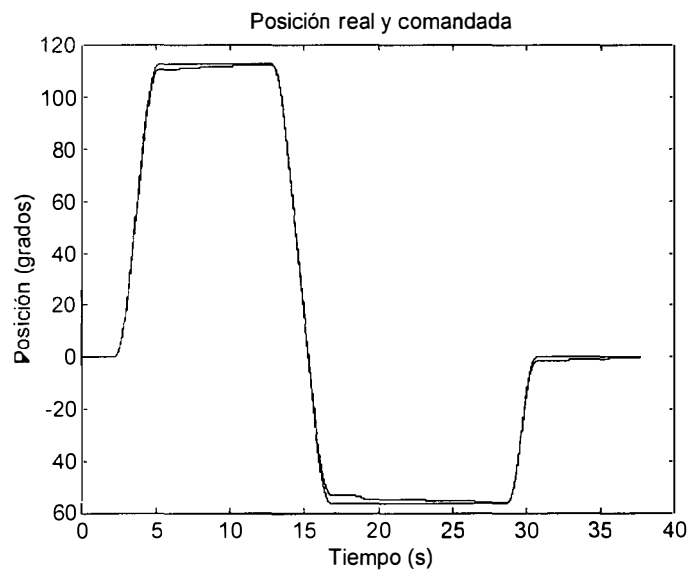


Figura 7.21 Posición real y comandada del motor 5

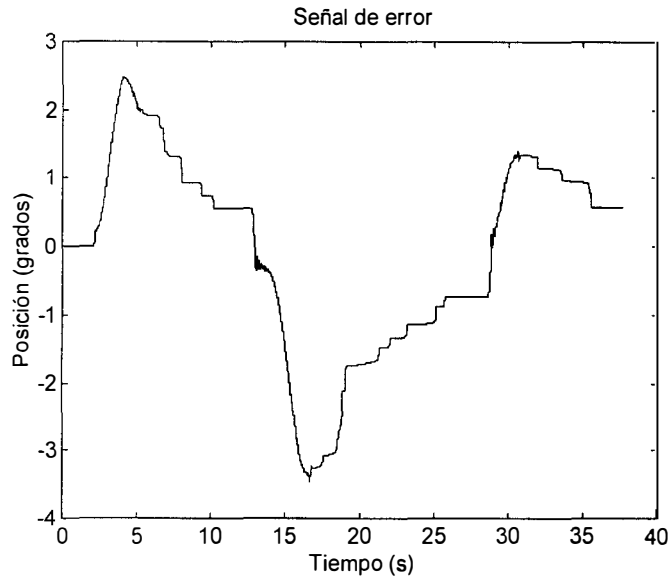


Figura 7.22 Error entre la posición real y la comandada del motor 5

7.4.6 Control de posición mediante realimentación del estado

Otro tipo de control que también se ha ensayado en algunas de las articulaciones del robot ha sido el de realimentación del estado. El esquema de regulación de este control coincide con el esquema que aparece en la figura 7.1, que es el control PD realimentado. Su comportamiento dinámico es exactamente igual al que se ha descrito en el apartado 7.2.1.1. Lo que si cambia, es el método de obtención de los valores de las ganancias K_P y K_V del regulador, que se hará con el método de colocación de polos, establecido con el uso de variables de estado, [Ogata, 93].

Para este diseño se han empleado las mismas funciones de transferencia que en los apartados anteriores. Sobre dicha función se ha considerado situar los polos del nuevo sistema como dos polos reales, y aplicando la fórmula de Ackerman se han obtenido los valores de la matriz de realimentación. En interesante indicar que los valores de estas ganancias son mucho menores que los que se dan en el PID adaptativo.

La figura 7.23 muestra la respuesta del motor 8, con este esquema de control y con el mismo tipo de entrada que las que usadas en el epígrafe anterior.

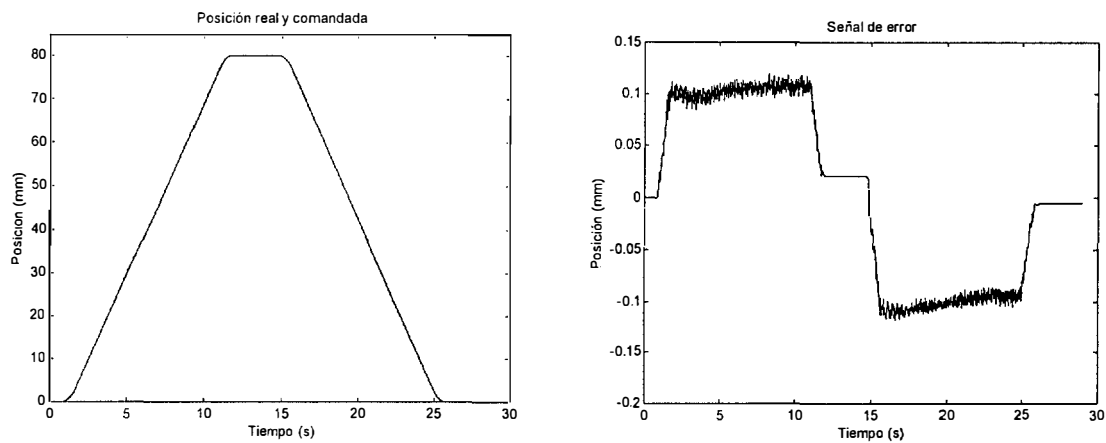


Figura 7.23 Posición y error de posición del motor 8 con realimentación de estado

En las diversas figuras se aprecia claramente la oscilación que tiene la señal de posición durante el tiempo que dura la rampa. El error en régimen permanente es casi nulo, pero hay más vibraciones en el caso de un PID con prealimentación adaptativo.

Para el motor 2 y 7 la respuesta es

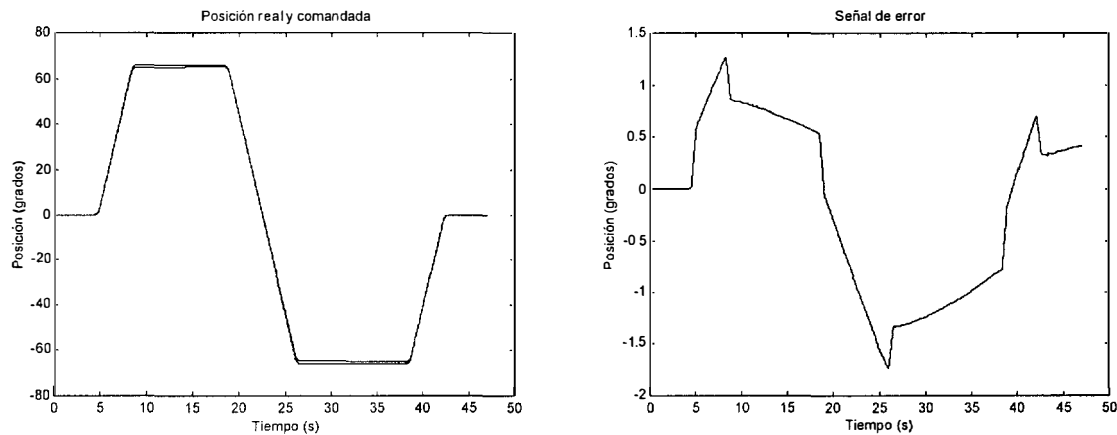


Figura 7.24 Posición y error de posición del motor 7 con realimentación de estado

En el caso del motor 3 la respuesta es:

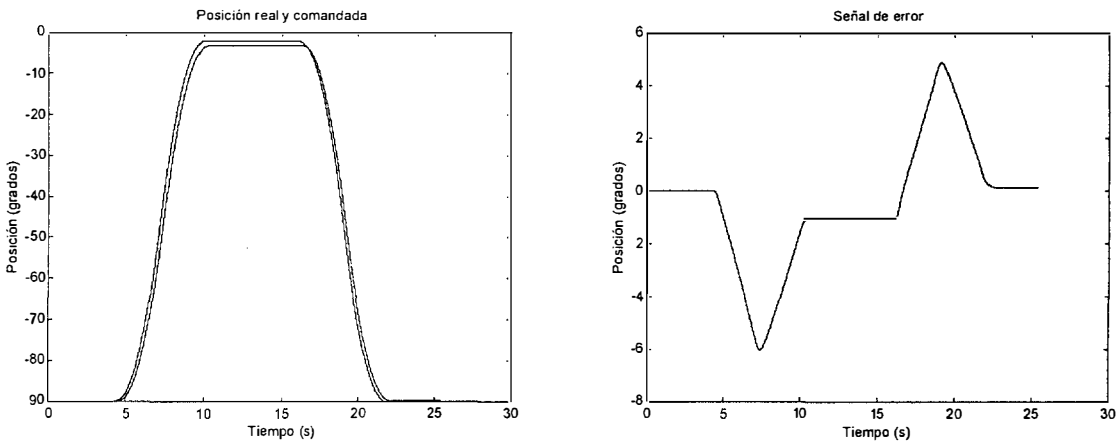


Figura 7.25 Posición y error de posición del motor 6 con realimentación de estado

El algoritmo de control recibe las lecturas de velocidad y posición del motor, y se ha utilizado un observador de velocidad pero los resultados obtenidos han dado un sistema mucho más lento que sin él, el error no mejora.

7.4.7 Control del par de las pinzas

Otra forma de controlar el movimiento de las pinzas es calculando el par de apriete que producen. Para este control no se ha usado ningún sensor de fuerza, pero sí que se ha medido indirectamente la fuerza que se hace entre las garras. Para tal efecto se colocó una célula de carga entre las garras de las pinzas, y se ha construido una tabla que genera la relación entre la tensión de entrada y la fuerza que se genera entre las garras, como aparece en las figuras 7.26 y 7.27.

Con la tabla que relaciona la tensión de referencia con la fuerza que se genera, se puede cerrar un bucle en función de la señal de referencia que se mande al amplificador, siempre y cuando el amplificador esté en modo corriente, la señal de referencia es proporcional a la corriente de comando que manda el amplificador al motor y al par que produce el motor. En estas dos gráficas aparecen los pares reales que hay en cada una de las

garras, que serán los que produce el motor correspondiente de la pinza, la relación de reducción que hay en los elementos de transmisión, engranajes y husillos, y los pares de fricción que se producen en dichos reductores.

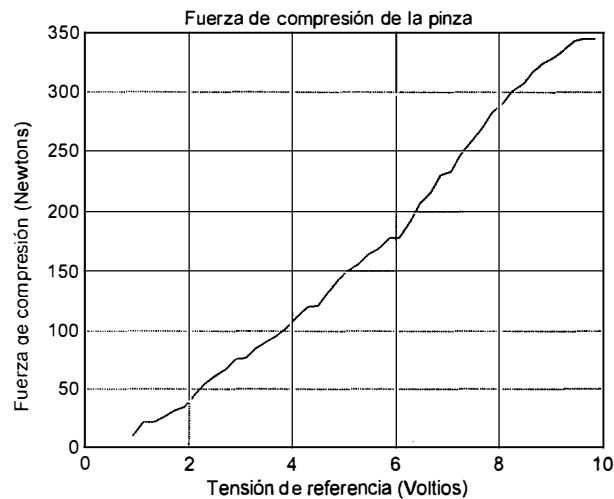


Figura 7.26 Gráfica tensión-fuerza con la pinza cercana al punto de apriete

La figura 7.26 muestra la fuerza que se produce entre las garras de la pinzas, si el movimiento de ésta parte de una posición muy cercana a la del punto de agarre.

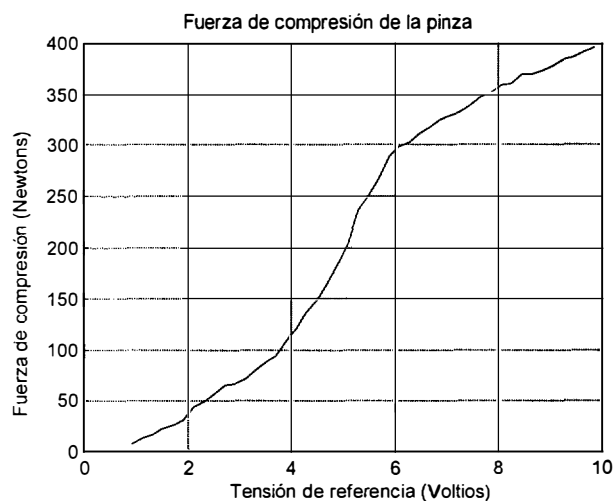


Figura 7.27 Gráfica tensión-fuerza con la pinza totalmente abierta

La gráfica 7.27 muestra la fuerza que se produce cuando la pinza no aprieta a la viga desde la posición de agarre, sino que lo hace partiendo de una posición en la que está totalmente abierta, para conseguir una fuerza mayor de agarre.

Hay dos formas de control del agarre:

- Se manda al robot con un control de posición a una posición más cerrada a la que tiene la viga, y cuando la señal de referencia vista antes se ha conseguido durante un intervalo de tiempo dado de 1 segundo, se considera que la pinza ha llegado al par que necesitaba y se corta la señal de control al motor.
- Se mueve al motor en bucle abierto de posición hasta que se consigue llegar a la fuerza que se quiere, pero en combinación con la medida de la corriente que se consume en el motor y que viene proporcionada por la tensión de referencia que llega al amplificador.

7.5 Consideraciones finales

En este capítulo se han obtenido los valores que deben tener las ganancias de los parámetros que conforman cada regulador para que el sistema sea estable. El regulador PID que se usa en el robot ROMA, tiene dos señales de prealimentación y un filtro (*notch-filter*) a la salida de la señal de control. Estos dos componentes no afectan en ningún caso a la estabilidad ya estudiada en el capítulo anterior. Ese estudio se ha realizado suponiendo que el sistema era continuo, pero el sistema real es híbrido ya que la parte del control está dentro de un sistema digital. Sin embargo, el tiempo de muestreo que usa la tarjeta de control de ejes es de 30 μ s, que es un tiempo suficientemente pequeño como para considerar que se le pueden aplicar las mismas conclusiones que al estudio hecho con el sistema continuo.

Es evidente que en un sistema real pueden aparecer saturaciones en la señal de control que sale de la tarjeta de control de ejes y va al amplificador. A la hora de la simulación con la herramienta Simulink de Matlab se ha considerado que el sistema es híbrido, con el periodo

de muestreo de la tarjeta de control de ejes, procurando que las ganancias del regulador no saturen la señal de control.

Por otra parte, con ganancias proporcionales, derivativas e integrales muy altas para los valores del regulador (el rango está entre $-8,388,608$ y $+8,388,607$), en la mecánica del robot pueden aparecer efectos no deseados (vibraciones, castañeteos, etc.) que pueden acabar incluso con la rotura de algunas piezas del sistema. Para ayudar a que todo esto no ocurra, durante los trabajos de simulación también se han buscado los perfiles de velocidad más adecuados para cada articulación, con los que sufran lo mínimo posible durante los periodos de aceleración y deceleración.

Conclusiones.

8.1 Conclusiones.

Durante las tres últimas décadas del siglo XX, los avances tecnológicos en el sector de la robótica industrial han sido muy grandes. Los robots son capaces de hacer tareas con un alto nivel de especialización en entornos muy estructurados. Sin embargo, en ambientes desconocidos o sujetos a cambios rápidos, los robots no han conseguido un nivel de desarrollo tan alto. Precisamente, son los sectores aerospacial, naval o el de la construcción, sectores en los que el entorno está poco estructurado, los que piden día a día un grado mayor de automatización y consecuentemente robots que puedan realizar diferentes tareas en estos entornos.

Concretamente, en el sector de la construcción, se han desarrollado diferentes prototipos de robots de grandes dimensiones para tareas de ensamblaje. Estos robots tienen su origen en las grúas tradicionales empleadas en la construcción de obras y en los robots manipuladores. Otro campo importante es el del diseño y desarrollo de robots que sean capaces de moverse por la estructura de un edificio, puente u otra obra civil para realizar tareas de inspección y mantenimiento, siendo éste el campo en el que se centra esta tesis. Para esta clase de trabajos los robots tienen que ser capaces de escalar y moverse por entornos muy complejos.

Hay varios prototipos de robots escaladores desarrollados en distintos centros de investigación de todo el mundo. La mayoría de estos robots están en fase experimental y ninguno de ellos consigue resolver todos los problemas que se pueden presentar en este tipo de entornos. El interés que ha despertado esta clase de robots es notable, y prueba de ello es el gran número de centros nacionales e internacionales que se dedican al desarrollo de estos robots, y la creación de una red temática europea CLAWAR (Climbing and Walking Robots) dedicada a poner en contacto a las empresas y centros de investigación interesados en el campo de los robots escaladores.

Durante esta tesis ha quedado demostrada la dificultad que conlleva crear un robot escalador. No es sencillo que un robot cumpla ciertos requisitos indispensables para un funcionamiento óptimo, como son:

- Bajo peso, con lo que necesitará menos energía para agarrarse, y en consecuencia, aumentará su autonomía de funcionamiento y podrá llevar más carga con un gasto menor.
- Gran maniobrabilidad para moverse sobre superficies con cualquier forma geométrica y construidas en cualquier material (ladrillo, acero, cristal, etc.)
- Gran nivel de autonomía, tanto en la energía como en el control.

El primer trabajo desarrollado en esta tesis ha sido documentarse exhaustivamente sobre los robots escaladores que se han construido en los principales centros de investigación

de todo el mundo. Además, se ha realizado un estudio de las posibles aplicaciones que pueden tener esta clase de robots.

Asimismo, en esta línea, se ha propuesto en la presente tesis una definición de lo que es un robot escalador, de la que hasta ahora no se ha encontrado ninguna durante la búsqueda bibliográfica, consultando con personalidades relevantes en este campo.

El reino animal es una buena fuente de ideas para inspirar el diseño de un robot escalador. En esta tesis se ha hecho un estudio profundo de los métodos de agarre y un análisis de la estructura muscular y ósea de los animales escaladores más significativos. También se han estudiado las estructuras cinemáticas de algunos de ellos. Hay que indicar que muchos de ellos han sido y son fuente de inspiración para la creación de los robots escaladores más conocidos. Posteriormente, se han analizado y descrito las diferencias que hay entre las propiedades mecánicas de un animal y de una máquina, analizando que ideas se pueden aprovechar del reino animal y cuáles no. Se ha comprobado que algunos animales tienen un mecanismo de agarre más avanzado de lo que pueda proporcionar cualquier máquina (las máquinas actuales tienen menor relación Fuerza de agarre/Peso).

A partir del estudio del reino animal, se han propuesto diferentes cinemáticas posibles para un robot que se mueva por una estructura tridimensional formada por vigas y columnas. De todas ellas se ha elegido la que se ha considerado la más óptima, y se ha construido un robot escalador (robot ROMA) capaz de moverse por las estructuras tridimensionales citadas. Hay que indicar que se ha construido un robot novedoso, con apenas prototipos similares y para una aplicación que no se había abordado antes.

Asimismo, se ha diseñado una arquitectura *hardware* de control que suponga el menor peso posible para la estructura del robot, pero que consiga tener un sistema de control a bordo. Se ha presentado una arquitectura de control que tiene una elevada capacidad de cómputo (se dispone de dos procesadores a bordo del robot y uno en la estación base con gran potencia de cálculo). Se ha procurado que la comunicación, vía radio, entre el robot y la base

sea lo más fiable y rápida posible, pasando la máxima información posible (órdenes del robot, programas e imágenes de la cámara) sin llegar a saturar nunca la línea de comunicación.

En el nivel superior se ha desarrollado un lenguaje de programación sencillo e intuitivo, adaptado a un robot escalador con ordenes del tipo *Moveforward*, *Movebackwards* o *LockGripper*. Asimismo, se ha desarrollado una interfaz gráfica cómoda y de fácil manejo desde la estación base, que permite monitorizar el estado permitiendo un control en el nivel superior.

Se ha visto que la fuerza de gravedad juega un papel muy importante en los robots escaladores. Si se quiere desarrollar un sistema de control de posicionamiento adecuado para un robot escalador se hace necesario la creación y estudio de modelos dinámicos que permitan conocer el papel primordial que juega la gravedad durante el movimiento del robot. La modelización del movimiento del robot pasa por el uso de técnicas de identificación de sistemas, mientras que se pueden utilizar las herramientas de análisis dinámico existentes para conocer su comportamiento.

Entre las diferentes técnicas de control que existen, las técnicas de control adaptativo y robusto se han propuesto como las más interesantes. El método de planificación de ganancias, debido a su sencillez y elevadas prestaciones se ha mostrado como una de las técnicas más potentes para abordar el problema de control de los robots propuestos. En esta tesis se ha propuesto una nueva línea de actuación en el campo de los robots escaladores, en un nivel más bajo que el control del paso (*gait*), que tiene que ver con el control de posicionamiento óptimo de cada articulación durante la secuencia de movimientos de un robot escalador.

8.2 Trabajos futuros.

Durante los trabajos realizados para el desarrollo de esta tesis ha quedado patente la viabilidad que tiene un robot de esta clase y la ayuda que puede proporcionar durante las tareas de inspección y mantenimiento de los entornos tridimensionales. Todo este tiempo de trabajo también ha servido para conocer cuáles pueden ser algunos de los caminos a seguir en las futuras investigaciones y en los próximos sucesores del robot ROMA.

Uno de los trabajos más interesantes a realizar es hacer un estudio más exhaustivo de los principios de agarre. Alguno de estos, sólo se pueden llevar a cabo de un modo analítico comprobando cuál es el mejor material con el que deben estar recubiertas las garras del robot. Asimismo, se podría mejorar mucho el control del agarre utilizando técnicas de control más avanzadas y colocando sensores de esfuerzo en las garras. También sería conveniente experimentar otras formas de agarre como son las ventosas de vacío (se consigue una mayor fuerza de agarre con menos peso, aunque conseguir que el robot fuese autónomo sería más complicado) o los electroimanes.

Es evidente que cuanto más peso tenga el robot, más energía necesitará para escalar y agarrarse a la superficie. Con el uso de materiales muy ligeros y resistentes se puede conseguir una estructura fuerte y poco pesada. No hay que olvidar que la mayor parte del peso del robot está en los actuadores y en los mecanismos de transmisión. Hay que buscar los que tengan una mayor relación par/peso con un consumo de potencia bajo. Con el avance de la técnica, posiblemente se obtendrán actuadores y reductores que se acerquen cada vez más a estos objetivos. En definitiva, lo que se persigue es tener una mecánica más robusta y refinada.

Aunque se ha demostrado que el número mínimo de grados de libertad que debe tener un robot escalador que quiera moverse por todas las caras de una estructura dinámica tridimensional es seis, cada uno de ellos aporta un peso considerable (actuador+reductor) al peso total del robot. Otra posible solución sería construir dos o más robots con menos grados

de libertad cada uno, y por tanto más ligeros, que trabajarán conjuntamente en las tareas de inspección y mantenimiento. Cada uno de ellos puede funcionar con la misma arquitectura y estrategia de control propuesta en esta tesis.

Con la arquitectura de control propuesta es posible abordar estrategias de control diferentes a la propuesta en esta tesis. La flexibilidad de la tarjeta controladora de ejes, junto con la potencia de cálculo de la que dispone hace posible implantar diferentes algoritmos de regulación. Así se podría experimentar con un control robusto en el robot para contrarrestar los efectos de la gravedad en el control de posicionamiento de un robot escalador.

Bibliografía.

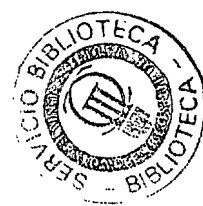
- [Abderrahim, 96] Abderrahim M., *Modelling of robotic manipulators*, Tesis doctoral, Universidad de Glasgow, 1996.
- [Akinfiev, 99] Akinfiev T., Armada M., y Caballero R., *Prototype of universal adaptive control system for quasi-resonance drive*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, Portsmouth, UK, 1999
- [Aracil, 99] Aracil R., Saltarén R., Sabater J.M., *TREPA, parallel climbing robot for maintenance of palm trees and large structures*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'99, Septiembre (1999), Portsmouth, Reino Unido
- [Argaéz, 91] Argaéz D.I., *An analytical and experimental study of the simultaneous control of motion and force of a climbing robot*, Masters of Science, M.I.T., 1991
- [Arimoto, 96] Arimoto S., Koga H., Naniwa T., *A VSS analysis of robot dynamics under Coulomb frictions and a proposal of inertia-only robots*, IEEE Workshop on Variable structure Systems, Tokio, Japón, 1996

- [Armada, 90] Armada M., González de Santos P., Nieto J., Araujo D., *On the design and control of a self-propelling robot for hazardous environments*, International Symposium on Industrial Robots, ISIR'90
- [Armstrong-Hélouvry, 91] Armstrong-Hélouvry B., *Control of machines with friction*, Kluwer Academic Publishers, 1991
- [Åström, 95] Åström K., Hägglund T., *PID controllers: theory, design, and tuning*, ISA, 1995
- [Åstrom, 96] Åstrom K.J., *Tuning and adaptation*, Proc. Of the 13th World congress, International of Automatic Control, 1996, San Francisco, EEUU.
- [Bach, 95] Bach W., Rachkov M., Seevers J., Hahn M., *High tractive power wall-climbing robot*, Automation in Construction, Elsevier, 1995
- [Backes, 97] Backes P., Bar-cohen J., Joffe B., *The multifunction automated crawling system (MACS)*, International Conference on Robotics and Automation, ICRA'97 San Francisco, Estados Unidos, 1997
- [Balaguer, 93] Balaguer C., Rodriguez F.J., Rodriguez C.F., García A., Barrientos A., Aracil R., Puente E.A., *TOROS: Graphical toolbox for robot simulation*, Int. Workshop on Graphics & Robotics, Dagstuhl, Alemania, 1993
- [Balaguer, 99a] Balaguer C., Padrón V.M., Giménez A., Pastor J.M., Abderrahim M., *Path planning strategy of autonomous climbing robot for inspection applications in construction*, 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC'99, Septiembre (1999), Madrid, España.
- [Balaguer, 99b] Balaguer C., Giménez A., Pastor J.M., Padrón V.M., Abderrahim M., *A climbing autonomous robot for inspection applications in 3D complex environments*, Robotica, 2000
- [Baldor, 95a] Baldor, *Servo control for brushless AC motors with digital control platform. Operating Manual*, 1995
- [Baldor, 95b] Baldor-Delta Tau, *PMAC User's Manual*, 1995
- [Barrientos, 97] Barrientos A., Peñín L.F., Balaguer C., Aracil R., *Fundamentos de robótica*, MacGraw-Hill, 1997.
- [Binnard, 95] Binnard B.M., *Design of a small pneumatic walking robot*, Degree of Master of Science, MIT, 1995

-
- [Briones, 94] Briones L., Bustamante P., Serna M.A., *Wall-Climbing Robot for Inspection in Nuclear Power Plants*, International Conference on Robotics and Automation, ICRA'94, San Diego, Estados Unidos, 1994
- [Browning, 99] Browning S., *Technical task 4. Nuclear operational maintenance applications*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'99, Portsmouth, Reino Unido
- [Canudas, 97] Canudas de Witt C., Siciliano B., Bastin G., *Theory of robot control*, Springer, 1997
- [Cooke, 98] Cooke D.S., Hewer N.D., White T.S., Galt S., Luk B.L., Hammond J., *Implementation of modularity in Robug IV*, First International Symposium on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'98, Bruselas, Bélgica, 1998
- [Cooke, 99] Cooke D.S., Hewer N.D., White T.S., Galt S., Luk B.L., Hammond J., *Implementation of modularity in Robug IV- preliminary results*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'99, Portsmouth, Reino Unido
- [Denavit, 55] Denavit J., Hartenberg R.S., *A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*, ASME Journal of Applied Mechanics, Junio 1955
- [Dorf, 98] Dorf R., Bishop R., *Modern control systems*, Addison-Wesley, 1998
- [Dote, 90] Dote Y., Kinoshita S., *Brushless servomotors. Fundamentals and applications*. Oxford Science Publications. 1990
- [Fisher, 92] Fisher J.W., *Failures of Bridge Components, Failure Analysis and Prevention*, ASM Handbook Formerly Ninth Edition, Metals handbook, Vol. 11. 1992
- [Fukuda, 87] Fukuda T., Otsuka, Hosoaki, *Autonomous pipeline inspection and maintenance robot with inch worm mobile mechanism*, 4th IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987
- [Fukuda, 99] Fukuda T., Kurashige K., Arai F., *Recent topics on robotic actuation technologies*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'99, Portsmouth, Reino Unido
-

- [Full, 89] Full R.J., Tu M.S., Ting, L.H., *Dynamics of insect locomotion compared to hexapod walking machines*, DSC- Volume 17, Issues in the Modeling and Control of Biomechanical Systems, editors: Steon, Ashton-Miller, and Pnady, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1989.
- [Full, 90] Full R.J., Tu M.S., *Mechanics of six-legged runners*, Journal of experimental biology, V. 148, 1990.
- [Full, 91] Full R.J., Tu M.S., *Mechanics of a rapid running insect: two-, four-, and six-legged locomotion*, Journal of experimental biology, V. 156, 1991.
- [Gambao, 96] Gambao E., Barrientos A., Balaguer C., Saltarén R., Aracil R., *Fuzzy-gain scheduling control architecture for large range robots*, 4th IEEE Mediterranean symposium on control & automation, Creta, Grecia, Junio 1996
- [Giménez, 93] Giménez A., *Diseño de una estructura de datos adecuada para el simulador TOROS*, Proyecto fin de carrera, UPM, DISAM, 1993.
- [Gradetsky, 98] Gradetsky V., *Wall climbing robot: evolution to intelligent autonomous vehicle*, First International Symposium on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'98, Bruselas, Bélgica, 1998
- [Gradetsky, 97] Gradetsky V., Rachkov M., Kalimichenko S., Semenov E., *Service robot for cleaning of vertical surfaces*, Workshop IARP'97, Génova, Italia, 1997.
- [Gradetsky, 92] Gradetsky V., Rachkov M., Nandi G.C., *Vacuum pedipulators for climbing robots*, 23rd International Symposium on Industrial Robots ISIR'92, Barcelona, España, 1992
- [Grieco, 97] Grieco Silva J.C., *Robots escaladores. Consideraciones acerca del diseño, estabilidad y estrategias de control*, Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, 1997
- [Hickman, 87] Hickman R., *Zoología. Principios integrales*, McGraw-Hill, 1987
- [Hildebrand, 95] Hildebrand M., *Analysis of vertebrate structure*, 4^a Edición, 1995
- [Hirose, 87] Hirose S., *Wall climbing vehicle using internally balanced magnetic unit*, 6th CISM-IFTOMM Symposium RoManSy-86, Cracovia, Polonia, 1986
- [Hirose, 92] Hirose S., Tsutsumitake H., *Disk Rover: A wall-climbing robot using permanent magnet disks*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992

-
- [Kamei, 94] Kamei R., Ogasawara K., Katamura R., *Development of multi-purpose mobile robot capable of traveling along columns and beams*, 11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Brighton, Reino Unido, 1994.
- [Kram, 94] Kram R., Wong B. Full R., *Three dimensional kinematics and internal mechanical energies of running cockroaches*, Journal of Experimental Biology, 1994
- [Kaufman, 97] Kaufman H., Barkana I., Sobel K., *Direct adaptive control algorithms. Theory and applications*, Springer, 1997
- [Khalil, 95] Khali H., *Nonlinear systems*, Modern Control Systems Study Guide, IEEE, 1995
- [Kelly, 97] Kelly R., *PD control with desired gravity compensation of robotic manipulators: A review*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 16, n° 5, Octubre 1997
- [Jahns, 94] Jahns T.M., *Motion control with permanent-magnet AC machines*, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, n° 8. 1994
- [Jardón, 98] Jardón A., *Diseño e implementación del conexionado mediante multiplexación de los sistemas electrónicos del robot ROMA*, Proyecto final de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 1998
- [La Rosa, 99] La Rosa G., Messina M, Muscato G., *SURFY: A low weight surfaces climbing robot (Design, control, assembly and preliminary tests)*, 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC'99, Septiembre (1999), Madrid, España.
- [Lewis, 93] Lewis F.L., Abdallah C.T., Dawson D.M., *Control of robot manipulators*, Macmillan publishing company, 1993
- [Ljung, 87] Ljung L., *System Identification. Theory for the user*, Prentice-Hall, 1987
- [Ljung, 95] Ljung L., *System Identification*, Modern Control Systems Study Guide, IEEE, 1995
- [Ljung, 98] Ljung L., *System Identification Toolbox for use with MATLAB*, 1998
-



- [Luk, 93] Luk B.L., Collie A.A., Bevan N., Billingsley J., *An articulated limb climbing vehicle with autonomous floor to wall transfer capability*, 1st IFAC Workshop on Intelligent Autonomous Vehicles, Hampshire, Reino Unido, 1993
- [Luk, 95] Luk B.L., Cooke D.S., Collie A.A. White A.A, *An arachnid robot for walking and climbing in disordered hazardous environments*, International Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS-4, Karlsruhe, Alemania, 1995
- [McHugh, 90] McHugh J.A., *Algorithmic graph theory*, Prentice Hall, 1995
- [McKerrow, 91] McKerrow P.J., *Introduction to robotics*, Addison-Wesley, 1991
- [Nagakubo, 94] Nagakubo A., Hirose S., *Walking and running of the quadruped wall-climbing robot*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'94, San Diego, Estados Unidos, 1994
- [Nechyba, 95] Nechyba M.C., Xu Y., *Human-robot cooperation in space: SM² for new space station structure*, IEEE Robotics & Automation Magazine, December 1995
- [Nishi, 86] Nishi A., Wakasugi Y., Watanabe K., *Design of a robot capable of moving on a vertical wall*, Advanced Robotics, Vol. 1, N° 1, 1986
- [Nishi, 92] Nishi A., *A biped walking robot capable of moving on a vertical wall*, Mechatronics Vol. 2, N° 6, Pergamon Press Ltd., 1992
- [Nishi, 99] Nishi A., Miyagi H., *Development of a flying -type wall-moving robot*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'99, Portsmouth, Reino Unido
- [Ogata, 93] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice-Hall, 1993
- [Paul, 81] Paul R.P., Shimano B., Mayer G.E., *Kinematics control equations for simple manipulators*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 11, N° 6, Junio 1981.
- [Paul, 82] Paul R.P., *Robot manipulators: mathematics, programming and control*, The MIT Press, 1982
- [Pratt, 99] Pratt J.E., Pratt G.A., *Exploiting natural dynamics in the control of a three-dimensional bipedal walking simulation*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, Portsmouth, UK, 1999

-
- [Prieto, 98] Prieto M., Armada M., *Experimental issues on wall climbing gait generation for a six-legged robot*, First International Symposium on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'98, Bruselas, Bélgica, 1998
- [Quinn, 99] Quin R., Ritzmann R., *Construction of a hexapod robot with cockroach kinematics benefits both robotics and biology*, 2nd International Workshop and Conference on Climbing & Walking Robots, CLAWAR'99, 1999.
- [Radevsky, 88] Radevsky R.A., Garas F.K., *Advanced robotics in the field of survey/inspection maintenance and repair of buildings and structures*, 5th International Symposium on Robotics in construction. Tokyo, Japón 1988
- [Randall, 99] Randall M.J., Pipe A.G., Winfield A.F.T., y Jin Y., *Adaptive neural control of walking robots with guaranteed stability*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, Portsmouth, UK, 1999
- [Rosenkrantz, 77] Rosenkrantz D.J., *An analysis of several heuristics for the TSP*. SIAM Journal of Computing, vol. 6., 1977
- [Saltarén, 99] Saltarén R., Aracil R., Reinoso O., Sabater J.M., Almonacid M., *Parallel climbing robots for construction, inspection and maintenance*, 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC'99, Septiembre (1999), Madrid, España.
- [Santibañez, 98] Santibañez V., Kelly R., Reyes F., *A new set-point controller with bounded torques for robot manipulators*, IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 45, nº 1, Febrero 1998
- [Schraft, 94] Schraft R.D., *Mechatronics and robotics for service applications*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 1, Nº 4, December 1994
- [Schraft, 99] Schraft R.D., Braeuning U., Orłowsky T., Hornemann M., *Automated cleaning of windows on standard facades*, 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC'99, Septiembre (1999), Madrid, España.
- [Sciavicco, 96] Sciavicco L., Siciliano B., *Modelling and control of robots manipulators*, McGraw-Hill, 1996
- [Serna, 97] Serna M.A., Avello A., *ROBICEN: A pneumatic climbing robot for inspection of pipes and tanks*, International Symposium on Experimental Robotics, Barcelona, España, 1997
-

- [Slotine, 91] Slotine J.J., Li W., *Applied nonlinear control*, Prentice-Hall, 1991
- [Song, 89] Song S.M., Waldron K.J., *Machines that walk: the adaptive suspension vehicle*, MIT press, 1989
- [Sugiyama, 86] Sugiyama S., Naitoh S., Satoh C., *Wall Surface vehicles with magnetic legs or vacuum legs*, 17th International Symposium on Industrial Robots, ISIR'86
- [Thomas, 99] Thomas J., *Modelado e identificación del comportamiento dinámico del robot ROMA*, Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, 2000
- [Todd, 85] Todd D.J., *Walking machines. An introduction to legged robots*, London Kogan Page Ltd., 1985
- [Tuttle, 92] Tuttle T., *Understanding and modeling the behavior of a Harmonic-Drive gear transmission*, Tesis doctoral, Laboratorio de Inteligencia Artificial, MIT, 1992
- [Tsukagoshi, 98] Tsukagoshi H., Hirose S., *Intermittent crawl gait for quadruped walking vehicles on rough terrain*, First International Symposium on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'98, Bruselas, Bélgica, 1998
- [Vas, 98] Vas P., *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford Science Publications, 1998
- [Virk, 99] Virk G.S., *Technical Task 1: Modularity for CLAWAR machines – Specifications and possible solutions*, 2nd International Workshop and Conference on Climbing & Walking Robots, CLAWAR'99, 1999.
- [Waterman, 99] Waterman R.N., *Technical Task 2. Industrial requirements - formulate specifications*, 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'99, Portsmouth, Reino Unido
- [Weidemann 93] Weidemann H.J., Pfeiffer, F., Eltze, J., *A design concept for legged robots derived from the walking stick insect*. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japón, Julio, 1993.
- [White, 98] White T., Hower N., Luk B.L., Hazel J., SADIE, *A climbing robot for weld inspection in hazardous environments*, First International Symposium on Climbing and Walking Robots, CLAWAR'98, Bruselas, Bélgica, 1998

- [Wilson, 66] Wilson, D.M., *Insect walking*, Annual review of entomology, V. 11, Annual reviews, Inc., 1966
- [Yamauchi, 94] Yamauchi, A., Wong, B., Kram, R., y Full, R.J., *Strategy of scaling steps in insects*, American Zoology 32: 29^a, 1993.

